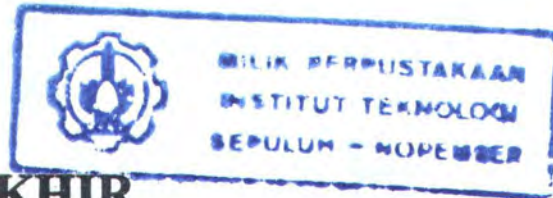


23.152/H/05



TUGAS AKHIR
(LK. 1347)

**STUDI TENTANG SIFAT BENDING MATERIAL
KOMPOSIT KAYU LAMINASI**



RSPe
620.12
Bud
S-1
2005

Oleh :

AGUS BUDIONO
NRP : 4199.100.068

PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	10-8-2005
Terima Dari	H/
No. Agenda Prp.	772248

**JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2005**

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI TENTANG SIFAT BENDING MATERIAL KOMPOSIT KAYU LAMINASI

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Salah Satu Syarat Untuk
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Perkapalan
Pada
Jurusan Teknik Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya

Surabaya, Juli 2005

Mengetahui /Menyetujui

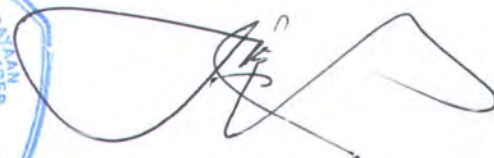
Dosen Pembimbing I



Ir. Soewefy, M.Eng.
NIP : 130.368.597



Dosen Pembimbing II



Ir. Budie Santoso, M.T.
NIP : 130.676.232



KATA PENGANTAR

Bismillahirrohmaanirrohiim,

Tiada kata yang patut diucapkan selain mengucapkan syukur alhamdulillah kehadirat Allah SWT yang tiada henti-hentinya memberikan rahmat serta hidayahNya kepada segenap makhluk yang ada dimuka bumi. Demikian pula atas ijin dan karunia Allah sematalah tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.

Selesainya penyusunan tugas akhir ini tentunya juga tidak terlepas dari bantuan semua pihak yang terlibat baik secara langsung maupun tidak langsung. Untuk itu dalam kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ir. Soewefy, M.Eng. selaku dosen pembimbing pertama yang telah mencurahkan segenap perhatiannya dalam memberikan bimbingan dan arahan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini dengan penuh kesabaran..
2. Ir. Budie Santoso, MT. selaku dosen pembimbing kedua yang telah banyak memberikan bimbingan dan arahan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
3. Ir. Triwilaswandio W.P, MSc. Selaku Ketua Jurusan Teknik Perkapalan serta seluruh dosen dan karyawan yang telah membantu kelancaran penyelesaian Tugas Akhir ini.
4. Ir. Wing Hendro Prasetyo, M.Eng. selaku kepala Laboratorium Konstruksi Jurusan Teknik Perkapalan yang telah membantu kelancaran pengujian dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
5. Ayahanda dan Ibunda serta kedua Kakakku dan Adikku tercinta yang telah mengorbankan segalanya untuk mewujudkan cita-cita Ananda.



6. Bapak Suwantono serta teman-teman di Laboratorium Komputasi Teknik Perkapalan yang banyak membantu dan sangat berperan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
7. Fitriyah yang sudi menemani untuk mencari literature, Hery "CeleK" Widiyanto atas pinjaman komputernya serta Rifai yang rela meminjamkan motornya untuk transportasi dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
8. Keluraga Besar "*SS Perkapalan*" yang telah memberikan semangat dan inspirasi kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
9. Adik-adikku, Ika Trisnawati, Indah, Sunarti, Wulandari, Maya Sari atas semangat dan ketersediaannya menjadi teman dalam suka dan duka.
10. Teman-teman KU-69 yang senantiasa memberikan motivasi agar selalu bersemangat dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
11. Semua pihak yang tidak dapat kami sebutkan satu persatu yang turut memberikan sumbangsih baik secara materiil maupun non materiil atas selesainya Tugas Akhir ini.

Seperti hakekatnya seorang manusia yang tidak pernah luput dari salah dan dosa, laporan tugas akhir ini juga masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu masukan dari semua pihak sangat penulis harapkan demi sempurnanya kualitas penulisan dimasa yang akan datang.

Akhir kata, semoga laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi para pembaca. Amiin.

Surabaya, Juni 2005

Penulis



ABSTRAK

Pengujian *three point bending* untuk kayu tunggal biasa dan kayu laminasi dilakukan untuk mengetahui defleksi beban dan tegangan rusak dari kayu. Untuk melakukan verifikasi pengujian, dengan model specimen tersebut diatas dilakukan perhitungan defleksi dan tegangan menggunakan MSC/NASTRAN.

Pengujian bending dilakukan dengan beban bertingkat (*incremental*) terdiri dari tiga jenis material laminasi yaitu tiga buah papan kayu tunggal biasa, tiga buah papan kayu laminasi dua layer dan tiga buah papan kayu laminasi tiga layer. Dengan software NASTRAN juga dibuat model dari setiap jenis benda uji kemudian didapatkan defleksi beban dan tegangan untuk tiap variasi beban.

Hasil yang didapat dari analisa mengenai kekuatan menahan beban, kelenturan dan sifat elastisitas adalah kayu tunggal biasa memiliki kekuatan lebih besar yaitu sebesar 20.000 N daripada kayu laminasi yang hanya memiliki kekuatan 14.000 N untuk laminasi dua layer dan 10.000 N untuk laminasi tiga layer. Dari sisi kelenturan, kayu laminasi tiga layer memiliki kelenturan 6,65 % dan kayu laminasi dua layer 1,98 % sedangkan kayu tunggal biasa hanya 1.16 % dari panjang spesimen. Besar tegangan yang bekerja pada daerah perekatan akan semakin besar dengan bertambahnya jumlah lapisan, untuk laminasi dua layer sebesar 2.937,25 KN/m² dan laminasi tiga layer 4.439,52 KN/m².



DAFTAR ISI

	Halaman
JUDUL TUGAS AKHIR	
LEMBAR PENGESAHAN	
KATA PENGANTAR.....	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GRAFIK	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang.....	I-1
1.2. Permasalahan	I-2
1.3. Tujuan	I-2
1.4. Batasan Masalah	I-2
1.5. Metodologi dan Model Analisis.....	I-3
1.6. Sistematika Laporan.....	I-5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Tinjauan Umum	II-1
2.2. Sifat-Sifat Mekanik Kayu	II-2
2.3. Pengertian Bahan Komposit.....	II-3



2.3.1. Tinjauan Umum.....	II-3
2.3.2. Pengertian Serat.....	II-4
2.3.3. Pengertian Matrik	II-5
2.4. Sifat-Sifat Kayu.....	II-6
2.4.1. Untung Rugi Kayu sebagai Bahan Konstruksi	II-8
2.4.2. Sifat-Sifat Mekanis Kayu	II-9
2.4.3. Perubahan Bentuk	II-12
2.5. Konstruksi Kayu laminasi.....	II-14
2.5.1. Persyaratan dan Ketentuan Untuk Konstruksi Kayu laminasi..	II-15
2.5.2. Keuntungan Penggunaan Konstruksi Kayu Laminasi	II-16
2.5.3. Kerugian Pemakaian Konstruksi Kayu Laminasi.....	II-16
2.5.4. Perbedaan Konstruksi Kayu laminasi Dengan Konstruksi Plywood	II-17
2.5.5. Pengaruh Lengkungan dan Tebal Lapisan Papan.....	II-17
2.6. Perekat Konstruksi Kayu Laminasi.....	II-18
2.6.1. Metode perekatan.....	II-19
2.6.2. Jenis-Jenis Perekat.....	II-20
2.6.3. Percampuran Perekat (Glue Mixing).....	II-22
2.7. Perhitungan Dengan Metode Elemen Hingga.....	II-23
2.7.1. Tahap Awal (Preprocessing).....	II-25
2.7.2. Tahap Perhitungan dan Analisis (solution).....	II-30
2.7.3. Tahap Akhir (Postprocessing)	II-31
2.8. Mekanika Komposit.....	II-32



2.8.1. Hubungan Tegangan dan Regangan Untuk Plane Stress Pada Material Orthotrop.....	II-34
2.8.2. Matrik kekakuan Bahan Komposit.....	II-35
2.8.3. Transformasi Matrik Kekakuan.....	II-37
2.8.4. Analisa Tegangan Regangan Pada Material Komposit Laminasi	II-40
2.8.5. Resultan Gaya dan Momen Pada Konstruksi laminasi.....	II-41
2.8.6. Modulus Elastisitas Arah Longitudinal (E_x) dan Modulus Elastisitas Arah Transversal (E_y)	II-44
2.8.7. Kelengkungan Akibat Beban Bending	II-45

BAB III PELAKSANAAN PENGUJIAN

3.1. Material Pengujian.....	III-1
3.2. Pembuatan Spesimen Uji	III-2
3.2.1. Spesimen Uji Tarik Resin.....	III-3
3.2.2. Spesimen Uji Bending Konstruksi Kayu Laminasi.....	III-5
3.3. Penentuan Beban.....	III-8
3.4. Pengujian.....	III-9
3.4.1. Tahap Pengujian Tarik.....	III-10
3.4.2. Tahap Pengujian Bending.....	III-11

BAB IV HASIL PENGUJIAN

4.1. Tinjauan Statistik Hasil Pengujian.....	IV-1
4.2. Pengujian Papan Kayu Tunggal Biasa.....	IV-3
4.3. Pengujian Papan Kayu Laminasi Dua Layer	IV-7



4.4. Pengujian Papan Kayu Laminasi Tiga Layer.....	IV-11
----------------------------------------------------	-------

BAB V ANALISA DAN PERHITUNGAN

5.1. Analisa Hasil Uji Bending	V-1
5.1.1. Hasil Uji Papan Kayu Tunggal Biasa, Kayu Laminasi Dua Layer dan kayu Laminasi Tiga Layer.....	V-1
5.1.2. Perhitungan Prosentase Defleksi Beban Terhadap Panjang Spesimen.....	V-3
5.1.3. Hasil Defleksi Sisa Pada Pengujian Papan Kayu Tunggal Biasa, Kayu Laminasi Dua Layer dan kayu Laminasi Tiga Layer.....	V-5
5.1.4. Perhitungan Prosentase Defleksi Sisa Terhadap Panjang Spesimen.....	V-6
5.2. Perhitungan Tegangan Bending.....	V-7
5.2.1. Perhitungan Tegangan Bending Pada Papan Kayu Tunggal Biasa	V-10
5.2.2. Perhitungan Tegangan Bending Pada Papan Kayu Laminasi Dua Layer	V-11
5.2.3. Perhitungan Tegangan Bending Pada Papan Kayu Laminasi Tiga Layer.....	V-12
5.3. Perhitungan Menggunakan MSC Nastran 4.5.....	V-13
5.3.1. Pembuatan Model Spesimen Untuk MSC Nastran 4.5.....	V-14
5.3.2. Verifikasi Hasil Perhitungan MSC/NASTRAN	V-15
5.3.3. Perhitungan MSCNastran Untuk Kayu Tunggal Biasa	V-17



5.3.4.	Perhitungan MSCNastran Untuk Kayu Laminasi Dua Layer ...	V-18
5.3.5.	Perhitungan MSCNastran Untuk Kayu Laminasi Tiga Layer...	V-19
5.4.	Perhitungan Tegangan Bending Dengan MSC Nastran 4.5	V-21
5.4.1.	Kayu Tunggal Biasa	V-21
5.4.2.	Kayu Laminasi Dua Layer.....	V-22
5.4.3.	Kayu Laminasi Tiga Layer	V-23
5.5.	Perhitungan Tegangan Bending Dengan MSC Nastran 4.5 Tiap Element Secara Melintang	V-24
5.5.1.	Kayu Tunggal Biasa	V-25
5.5.2.	Kayu Laminasi Dua Layer.....	V-26
5.5.3.	Kayu Laminasi Tiga Layer	V-29
5.6.	Pengaruh Letak Kerusakan Awal Pada Material Kayu Laminasi Terhadap Kekuatannya.....	V-32
5.6.1.	Kerusakan Pada Material Kayu Tunggal Biasa dan Hasil Defleksi Beban Tiap Spesimen Pengujian.....	V-33
5.6.2.	Kerusakan Pada Material Kayu Laminasi Dua Layer dan Hasil Defleksi Beban Tiap Spesimen Pengujian	V-35
5.6.3.	Kerusakan Pada Material Kayu Laminasi Tiga Layer dan Hasil Defleksi Beban Tiap Spesimen Pengujian	V-36
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN		
6.1.	Kesimpulan	VI-1
6.2.	Saran.....	VI-3
DAFTAR PUSTAKA		
LAMPIRAN		

**DAFTAR TABEL**

	Halaman
Tabel 2.1 Tabel macam-macam perekat.....	II-21
Tabel 2.2 Tipe elemen yang dipakai didalam MSC/NASTRAN	II-26
Tabel 2.3 Tipe analisis yang dipakai didalam MSC/NASTRAN.....	II-31
Tabel 4.1 Tabel perhitungan regresi polynomial.....	IV-1
Tabel 4.2.1 Pengujian 1; kayu tunggal biasa.....	IV-3
Tabel 4.2.2 Pengujian 2; kayu tunggal biasa.....	IV-4
Tabel 4.2.3 Pengujian 3; kayu tunggal biasa.....	IV-5
Tabel 4.2.4 Hasil rata-rata; kayu tunggal biasa.....	IV-6
Tabel 4.3.1 Pengujian 1; kayu laminasi dua layer.....	IV-7
Tabel 4.3.2 Pengujian 2; kayu laminasi dua layer.....	IV-8
Tabel 4.3.3 Pengujian 3; kayu laminasi dua layer.....	IV-9
Tabel 4.3.4 Hasil rata-rata; kayu laminasi dua layer.....	IV-10
Tabel 4.4.1 Pengujian 1; kayu laminasi tiga layer	IV-11
Tabel 4.4.2 Pengujian 2; kayu laminasi tiga layer	IV-12
Tabel 4.4.3 Pengujian 3; kayu laminasi tiga layer	IV-13
Tabel 4.4.4 Hasil rata-rata; kayu laminasi tiga layer.....	IV-14
Tabel 5.1 Hasil Pengujian Papan Kayu Tunggal Biasa, Papan Kayu Laminasi Dua Layer dan Papan Kayu laminasi Tiga Layer.....	V-1
Tabel 5.2 Hasil Prosentase Defleksi Beban Terhadap Panjang Spesimen	V-3
Tabel 5.3 Defleksi Sisa Hasil Pengujian Papan Kayu Tunggal Biasa, Kayu Laminasi Dua Layer dan Kayu Laminasi Tiga Layer	V-5



Tabel 5.4	Hasil Prosentase Defleksi Sisa Terhadap Panjang Spesimen.....	V-6
Tabel 5.5	Tabel Perhitungan I untuk kayu Laminasi	V-9
Tabel 5.6	Defleksi, Momen, dan Tegangan Bending pada papan kayu tunggal biasa.....	V-10
Tabel 5.7	Defleksi, Momen, dan Tegangan Bending pada papan kayu Laminasi Dua Layer	V-11
Tabel 5.8	Defleksi, Momen, dan Tegangan Bending pada papan kayu Laminasi Tiga Layer	V-12
Tabel 5.9	Hasil Pengujian dan Hasil Perhitungan Nastran Kayu Tunggal Biasa	V-17
Tabel 5.10	Hasil Pengujian dan Hasil Perhitungan Nastran Kayu Laminasi Dua Layer	V-18
Tabel 5.11	Hasil Pengujian dan Hasil Perhitungan Nastran Kayu Laminasi Tiga Layer	V-19
Tabel 5.12	Perhitungan Tegangan Bending Pada Pengujian dan Hasil Perhitungan Nastran 4.5 Pada Kayu Tunggal Biasa.....	V-21
Tabel 5.13	Perhitungan Tegangan Bending Pada Pengujian dan Hasil Perhitungan Nastran 4.5 Pada Kayu Laminasi dua layer	V-22
Tabel 5.14	Perhitungan Tegangan Bending Pada Pengujian dan Hasil Perhitungan Nastran 4.5 Pada Kayu Laminasi Tiga layer.....	V-23
Tabel 5.15	Tabel Tegangan Tiap Element Kayu Tunggal Biasa.....	V-25
Tabel 5.16	Tabel Tegangan Tiap Element Kayu Laminasi Dua Layer.....	V-27
Tabel 5.17	Tabel Tegangan Tiap Element Kayu Laminasi Tiga Layer	V-30

**DAFTAR GRAFIK**

	Halaman
Grafik 3.1 Grafik stress-strain.....	III-13
Grafik 3.2 Grafik deflection dan pembebanan.....	III-14
Grafik 4.2.1 Pengujian 1; kayu tunggal biasa.....	IV-3
Grafik 4.2.2 Pengujian 2; kayu tunggal biasa.....	IV-4
Grafik 4.2.3 Pengujian 3; kayu tunggal biasa.....	IV-5
Grafik 4.2.4 Rata-rata pengujian; kayu tunggal biasa.....	IV-6
Grafik 4.3.1 Pengujian 1; kayu laminasi dua layer.....	IV-7
Grafik 4.3.2 Pengujian 2; kayu laminasi dua layer.....	IV-8
Grafik 4.3.3 Pengujian 3; kayu laminasi dua layer.....	IV-9
Grafik 4.3.4 Rata-rata pengujian; kayu laminasi dua layer	IV-10
Grafik 4.4.1 Pengujian 1; kayu laminasi tiga layer.....	IV-11
Grafik 4.4.2 Pengujian 2; kayu laminasi tiga layer.....	IV-12
Grafik 4.4.3 Pengujian 3; kayu laminasi tiga layer.....	IV-13
Grafik 4.4.4 Rata-rata pengujian; kayu laminasi tiga layer	IV-14
Grafik 5.1 Hubungan beban dan defleksi beban.....	V-2
Grafik 5.2 Prosentase defleksi beban terhadap panjang spesimen pada beban 10.000 N.....	V-4
Grafik 5.3 Hubungan beban dan defleksi sisa	V-6
Grafik 5.4 Prosentase defleksi sisa terhadap panjang specimen.....	V-7
Grafik 5.5 Hubungan tegangan dan defleksi pada kayu tunggal biasa	V-10



Grafik 5.6	Hubungan tegangan dan defleksi pada kayu laminasi dua layer..	V-11
Grafik 5.7	Hubungan tegangan dan defleksi pada kayu laminasi tiga layer..	V-12
Grafik 5.8	Hasil percobaan dan perhitungan nastran kayu tunggal biasa.....	V-17
Grafik 5.9	Hasil percobaan dan perhitungan nastran kayu laminasi dua layer	V-18
Grafik 5.10	Hasil percobaan dan perhitungan nastran kayu laminasi tiga layer	V-19
Grafik 5.11	Hubungan tegangan dan beban hasil pengujian dan nastran kayu tunggal biasa	V-21
Grafik 5.12	Hubungan tegangan dan beban hasil pengujian dan nastran kayu laminasi dua layer	V-22
Grafik 5.13	Hubungan tegangan dan beban hasil pengujian dan nastran kayu laminasi tiga layer	V-23
Grafik 5.14	Grafik distribusi tegangan pada kayu tunggal biasa.....	V-26
Grafik 5.15	Grafik distribusi tegangan pada kayu laminasi dua layer.....	V-28
Grafik 5.16	Grafik distribusi tegangan pada kayu laminasi tiga layer	V-31
Grafik 5.17	Hasil pengujian tiga spesimen kayu tunggal biasa.....	V-34
Grafik 5.18	Hasil pengujian tiga spesimen kayu laminasi dua layer.....	V-36
Grafik 5.19	Hasil pengujian tiga spesimen kayu laminasi tiga layer.....	V-37





DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Tiga prinsip sumbu pada kayu dengan serat dan cincin tumbuh.....	II-10
Gambar 2.2 Macam-macam perubahan bentuk pada kayu	II-14
Gambar 2.3 Cross-sectional plan of firehose press	II-19
Gambar 2.4 Tipe material yang bisa digunakan dalam MSC/NASTRAN.....	II-28
Gambar 2.5 Definisi tipe material orthotrop 2D dalam MSC/NASTRAN	II-28
Gambar 2.6 Perubahan mekanika material.....	II-33
Gambar 2.7 Orthotropik laminasi dengan prinsip koordinat.....	II-35
Gambar 2.8 Gambar orientasi sudut serat	II-37
Gambar 2.9 Variasi σ dan ϵ terhadap ketebalan laminasi	II-41
Gambar 2.10 Jarak z dari bidang tengah	II-42
Gambar 2.11 Kelengkungan akibat beban bending.....	II-46
Gambar 3.1 Spesimen uji tarik resin	III-4
Gambar 3.2 Spesimen uji bending kayu laminasi	III-8
Gambar 3.3 Pengujian tarik.....	III-10
Gambar 3.4 Pengujian bending	III-12
Gambar 5.1 Gambar pembagian Element Material Secara Melintang Searah ketebalan dan pembebanan kayu tunggal biasa.....	V-25
Gambar 5.2 Gambar Hasil Running Untuk Tegangan pada kayu tunggal biasa dengan MSC Nastran.....	V-26



- Gambar 5.3 Gambar pembagian Element Material Secara Melintang
Searah ketebalan dan pembebanan kayu laminasi dua layer..... V-27
- Gambar 5.4 Gambar Hasil Running Untuk Tegangan pada kayu laminasi
dua layer dengan MSC Nastran..... V-28
- Gambar 5.5 Gambar pembagian Element Material Secara Melintang
Searah ketebalan dan pembebanan kayu laminasi tiga layer..... V-29
- Gambar 5.6 Gambar Hasil Running Untuk Tegangan pada kayu laminasi
tiga layer dengan MSC Nastran..... V-30
- Gambar 5.7 Gambar Spesimen 1 kayu tunggal biasa setelah pengujian..... V-33
- Gambar 5.8 Gambar Spesimen 2 kayu tunggal biasa setelah pengujian..... V-33
- Gambar 5.9 Gambar Spesimen 3 kayu tunggal biasa setelah pengujian..... V-34
- Gambar 5.10 Gambar Spesimen 1 kayu laminasi dua layer setelah
pengujian V-35
- Gambar 5.11 Gambar Spesimen 2 kayu laminasi dua layer setelah
pengujian V-35
- Gambar 5.12 Gambar Spesimen 3 kayu laminasi dua layer setelah
pengujian V-35
- Gambar 5.13 Gambar Spesimen 1 kayu laminasi tiga layer setelah
pengujian V-36
- Gambar 5.14 Gambar Spesimen 2 kayu laminasi tiga layer setelah
pengujian V-36
- Gambar 5.15 Gambar Spesimen 3 kayu laminasi tiga layer setelah
pengujian V-37



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Kapal kayu banyak digunakan di perairan nusantara. Pembuatan kapal kayu pada galangan dapat menggunakan material komposit kayu laminasi sebagai bahan konstruksi untuk gading ataupun pada konstruksi lunas.

Untuk konstruksi-konstruksi tertentu seperti linggi, lunas, tiang utama dan gading besar memerlukan dimensi yang besar. Konstruksi ini jika menggunakan kayu tunggal biasa akan mengalami kesulitan untuk mendapatkan material dan harganya mahal. Karena itu dikembangkan teknologi laminasi untuk mempermudah mendapatkan material dimana kayu-kayu yang lebih tipis bisa digunakan sehingga menghemat biaya material kayu. Material komposit kayu laminasi berbeda dengan material-material lain seperti baja atau balok kayu secara utuh. Material komposit kayu laminasi dibuat dengan menggunakan papan-papan kayu tipis yang dilekatkan satu sama lain.

Pada kayu tunggal biasa sudah banyak dilakukan penelitian tentang kekuatannya. Untuk material komposit kayu laminasi masih jarang dilakukan penelitian mengenai pengaruh ketebalan lapisan terhadap kekuatan material. Pada material laminasi dibuat dengan perekatan sehingga bisa terjadi slip antar lapisan yang menyebabkan kerusakan.



Untuk mengetahui sejauh mana pengaruh ketebalan lapisan terhadap kekuatan material komposit kayu laminasi dalam menerima beban bending, maka dalam tugas akhir ini dilakukan pengujian dan penelitian terhadap kekuatan material tersebut. (*Bureau of Ships, Wood: A Manual for Its use as A Shipbuilding Material Vol. 4, 1957*)

1.2. PERMASALAHAN

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, pokok permasalahan yang harus dipecahkan adalah:

Bagaimana pengaruh ketebalan dan jumlah lapisan material komposit kayu laminasi terhadap sifat-sifat bending material laminasi dalam menerima beban bending yang bekerja pada material tersebut?

1.3. TUJUAN

Penulisan tugas akhir ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh ketebalan dan jumlah lapisan terhadap sifat-sifat bending material komposit kayu laminasi.

1.4. BATASAN MASALAH

Dalam makalah tugas akhir ini penulis melakukan pembatasan masalah sebagai berikut :

1. Dititik beratkan pada pengujian beberapa material komposit dengan beberapa model laminasi antara 2 atau lebih lapisan kayu dan diuji.
2. Bahan yang dipakai sebagai perekat adalah Epoxy Resin
3. Pengujian yang dilakukan adalah uji bending.
4. Berat Spesimen Diabaikan.



5. Spesimen pengujian laminasi hanya dibatasi untuk satu sudut serat yaitu sejajar atau 180°

1.5. METODOLOGI DAN MODEL ANALISIS

Metode yang digunakan dalam penyusunan tugas akhir ini meliputi :

1. Studi Literature

Dilakukan studi literature tentang kayu dengan tujuan merangkum teori-teori dasar serta acuan dalam penulisan tugas akhir ini.

2. Perumusan permasalahan

Pada tahap ini dilakukan perumusan permasalahan berdasarkan langkah sebelumnya.

3. Pengujian

Pada tahap ini akan dilakukan pembuatan specimen untuk masing-masing jenis laminasi, penyiapan peralatan kemudian dilakukan pengujian yaitu uji bending. Dari pengujian ini, akan diperoleh kemampuan masing – masing spesimen dalam menerima beban serta hubungan antara besarnya beban dengan lenturan yang terjadi.

4. Analisa dan perhitungan

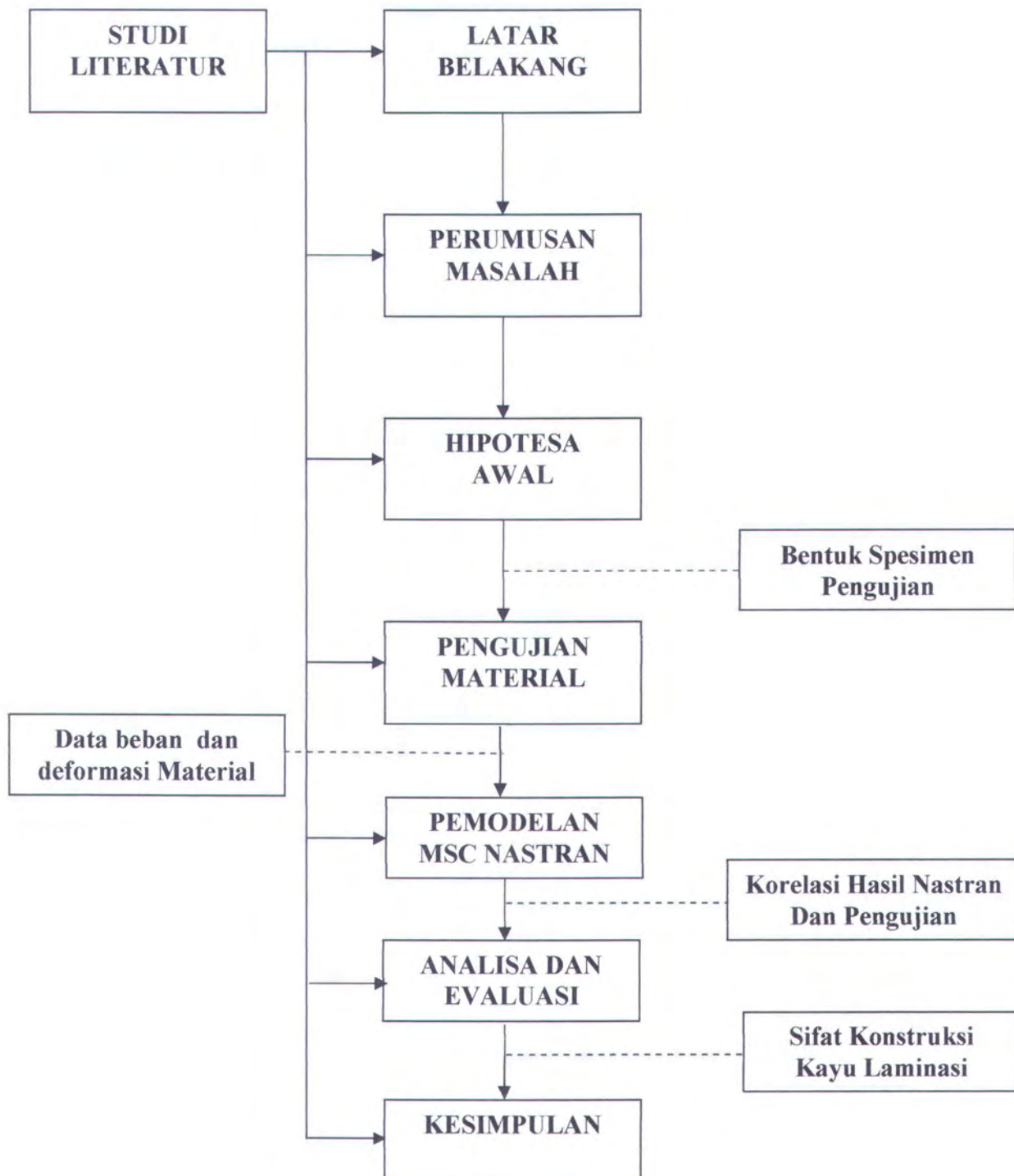
Pada tahap ini akan dilakukan analisa hasil pengujian dan perhitungan besarnya tegangan yang dimiliki masing-masing spesimen tersebut.

5. Kesimpulan

Dari hasil analisa, diambil kesimpulan mengenai kelebihan dan kekurangan yang dimiliki oleh masing-masing material laminasi yang diuji.



Adapun urutan dari metodologi dan model analisis dapat dilihat pada diagram berikut ini :





1.6. SISTEMATIKA LAPORAN

KATA PENGANTAR

ABSTRAK

DAFTAR ISI

DAFTAR GRAFIK

BAB I PENDAHULUAN

- 1.1. Latar Belakang
- 1.2. Permasalahan
- 1.3. Tujuan
- 1.4. Batasan Masalah
- 1.5. Metodologi
- 1.6. Sistematika Penulisan

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

BAB III TEKNIK PENGUJIAN

BAB IV HASIL PENGUJIAN

BAB V ANALISA DAN PERHITUNGAN

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

- 6.1. Kesimpulan
- 6.2. Saran

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Dalam tinjauan pustaka ini akan diuraikan teori – teori yang menjadi landasan dalam mengerjakan Tugas Akhir, yaitu akan dibahas mengenai sifat-sifat material komposit dalam hal ini adalah kayu dan resin sebagai bahan perekat serta penggunaannya dalam konstruksi kapal kayu.

2.1. Tinjauan Umum¹.

Seperti kita ketahui Indonesia adalah suatu negeri yang kaya akan kayu, baik kaya dalam jenisnya maupun kaya dalam kuantitasnya. Tetapi dalam penggunaannya justru terlalu berlebihan sehingga pada akhirnya untuk beberapa jenis kayu menjadi sangat sulit dipasaran. Dalam perkembangan selanjutnya bahwa didalam konstruksi kayu, kita belum banyak melakukan penelitian-penelitian terhadap sifat-sifat kayu terhadap beban yang bekerja, untuk mendapatkan konstruksi kayu yang memungkinkan penghematan dalam pemakaian. Dengan pengetahuan tentang dasar-dasar bangunan kayu dan penelitian-penelitian orang ahli, maka pemakain kayu dapat diefektifkan dan dihemat.

Kayu adalah suatu bahan konstruksi yang didapatkan dari tumbuhan dalam alam. Karena itu tidak hanya merupakan salah satu bahan konstruksi pertama di dalam sejarah kehidupan manusia, tetapi juga yang terakhir. Sebagai salah satu bahan konstruksi pertama, jauh sebelum ilmu pengetahuan, khusus matematika, memperlengkap kita dengan suatu teori untuk perencanaan konstruksi, maka

¹ . Cahyono, Agus Heru (2004)



teknik penggunaan kayu sebagai bahan konstruksi pada jaman yang lampau didasarkan hanya atas pengalaman dan intuisi. Sekarang kita maklum bahwa ilmu teknik konstruksi kayu (*Timber Engineering*), yang dimulai di Jerman pada permulaan abad ke-20, telah dan masih terus mengalami transisi dari suatu bidang ilmu pengetahuan pertukangan kayu tradisional ke suatu ilmu pengetahuan berdasarkan perhitungan matematis yang sudah digunakan pada konstruksi-konstruksi baja dan beton.

2.2. Sifat – Sifat Mekanik Material

Dalam merancang sebuah struktur, sifat mekanik dari material yang digunakan akan sangat mempengaruhi kondisi struktur tersebut, karena dengan mengetahui sifat mekanik dari material, kemampuan suatu material/bahan untuk menerima beban/gaya/energi dengan tanpa menimbulkan kerusakan pada bahan tersebut dapat kita ketahui.

Menurut Suherman (1987) secara umum, beberapa sifat material yang penting adalah sebagai berikut :

- Kekuatan (*Strength*), merupakan kemampuan bahan untuk menerima tegangan tanpa menyebabkan bahan menjadi patah.
- Kekerasan (*Hardness*), merupakan kemampuan bahan untuk tahan terhadap penggoresan, pengikisan dan penetrasi.
- Kekenyalan (*Elasticity*), merupakan kemampuan bahan untuk menerima tegangan tanpa mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk yang permanen setelah tegangan dihilangkan.



- Kekakuan (*Stiffness*), merupakan kemampuan bahan untuk menerima tegangan tanpa mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk.
- Plastisitas (*Plasticity*), merupakan kemampuan bahan untuk mengalami sejumlah deformasi plastik tanpa terjadinya kerusakan.
- Kelelahan (*Fatigue*), merupakan kecenderungan dari material untuk patah bila menerima tegangan berulang (periodik) yang besarnya masih jauh di bawah batas kekuatan elastisnya

2.3. Pengertian Bahan Komposit.²

2.3.1. Tinjauan Umum

Komposit adalah suatu material yang pada dasarnya terbentuk dari dua atau lebih bahan dasar yang berbeda yaitu *reinforced* yang berfungsi sebagai penguat dan matrik yang berfungsi sebagai pembentuk dan pengikat antar *reinforced*.

Secara garis besar ada tiga macam type komposit yaitu :

- Fibrous composite yaitu komposit dengan penguat fiber.
- Laminate composite yaitu komposit yang terdiri dari lapisan berbagai material.
- Particulate composite yaitu komposit dengan penguat partikel.

Fiber merupakan material dengan kekuatan yang tinggi dan modulus elastisitas yang tinggi, dapat diperoleh dari alam atau sintesis seperti fiberwood, fiberglass, fibercarbon, dll. Sedangkan matrik merupakan material yang mempunyai berat persatuan volume kecil, ulet, luruh, modulus elastisitas rendah

² . Arief, Muhammad Y (1996).



seperti Urea, Epoxy, Phenolix, dll. Sehingga bila material tersebut digabung (umumnya disebut komposit) akan menjadi material yang mempunyai kekuatan persatuan berat yang besar.

Selain itu kita bisa memilih sifat-sifat sesuai yang kita inginkan, adapun sifat-sifat yang bisa kita peroleh dari pembuatan komposit adalah :

- | | |
|--------------------|-----------------------|
| - Kekuatan | - Umur lelah |
| - Kekakuan | - Konduktifitas panas |
| - Ketahanan korosi | - Isolasi panas |
| - Berat | - Isolasi akustik |
| - Ketahanan aus | - Penampilan. |

Hanya saja tidak semua sifat-sifat komposit tersebut dapat diperoleh hanya dengan membuat satu jenis komposit saja. Pada saat ini penggunaan komposit mulai diperhitungkan pada berbagai industri, termasuk industri galangan kapal kayu atau kapal fiber. Sehingga pemakaian komposit mulai diperhitungkan dibanding material lain terutama logam.

Beberapa kelebihan komposit

1. mempunyai berat persatuan volume yang relative kecil.
2. mempunyai kekuatan persatuan berat yang tinggi.
3. kekuatan yang dapat diatur arahnya sesuai dengan kondisi pembebanan.
4. cocok digunakan untuk benda kerja dengan bentuk kompleks.

2.3.2. Pengertian Serat

Produk serat, baik dari bahan organik atau anorganik kebanyakan digunakan untuk pembuatan tekstil, laminat plastic dan komposit resin. Faktor



penting yang mempengaruhi rekatan adalah seberapa dalam dan merata masuknya perekat kebagian dalam seratnya.

Serat alam seperti katun, wool, selulose (ternasuk kayu) mengandung bermacam-macam polar yang sesuai bagi perekat, sedangkan bahan dari poliklonitri, poliamida, poliester dan polioefin cenderung berenergi rendah sehingga adhesive lemah, oleh karena itu perlu dilakukan kimia tertentu.

2.3.3. Pengertian Matrik

Matrik merupakan bahan yang diperekat oleh serat penguat dan berfungsi mengikat penguat yang satu dengan yang lainnya. Bahan yang umumnya dipakai sebagai matrik adalah logam dan polimer.

Untuk penggunaan yang sering ditemui di industri adalah jenis polimer, adapun jenis polimer yang ada adalah sebagai berikut :

1. resin polyester, merupakan resin yang sering digunakan pada proses manufacturing, pada pelapisaan digunakan katalis untuk mempercepat proses pengerasan dari resin tersebut.
2. resin epoxy, merupakan pengkondensasian antara epikloridrin dengan senyawa polihidroksi.
3. resin silicon, yaitu senyawa organik yang merupakan ikatan antara silicon dengan atom oksigen.
4. resin furin, resin ini diperoleh dengan proses kondensasi fulfuril alkhohol dengan fulfural.
5. resin fenolix, resin ini diperoleh dengan proses kondensasi fhenolphenol dengan aldehyd.



2.4. Sifat – Sifat Kayu.³

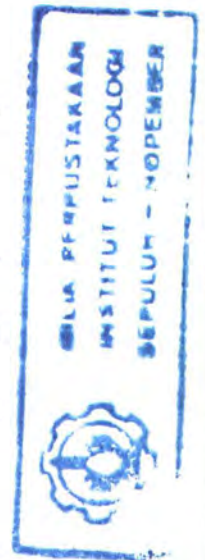
Penilaian dan perbandingan teknis dari kayu dengan bahan-bahan konstruksi lain menurut K.H. Felix Yap (1991) dapat dicapai dengan meninjau satu demi satu anggapan-anggapan yang biasa diambil dalam perhitungan konstruksi, yaitu :

- Untuk keperluan-keperluan praktis, baja dianggap homogen artinya bagian-bagian dalam suatu benda baja mempunyai sifat-sifat fisis yang sama. Tetapi mikroskopis baja pun tidak homogen karena terdiri dari bermacam-macam kristal dengan sifat-sifat berlainan. Kayu yang terdiri dari serat-serat, tentunya tidak dapat disebut homogen seperti baja, namun didalam praktek teknik konstruksi, kayu masih dapat dianggap bahan yang homogen, tetapi cukup jelas bahwa adanya cacat-cacat seperti mata kayu perlu diperhatikan dan menyebabkan perbedaan dengan dasar-dasar perhitungan yang lazim.
- Seperti pada baja, hukum hooke berlaku untuk kayu sampai suatu batas yang kita kenal sebagai batas proporsional, tetapi kayu tidak mempunyai batas meleleh seperti baja. Bentuk diagram tegangan perubahan panjang untuk kayu menyamai diagram untuk bahan-bahan batu seperti beton. Untuk baja biasa batas proporsional dicapai pada 50% daripada tegangan patah. Untuk kayu, dari penyelidikan-penyelidikan ternyata bahwa pada pembebanan tekan, batas proporsional dicapai pada 75% daripada tegangan patah, jadi tinjau dari aspek ini kayu lebih menguntungkan.

³ . Yap, K.H. Felix (1991)



- Pada pembebanan tekan biasanya kayu bersifat elastis sampai batas proporsional. Untuk keadaan tarikan belum ada banyak keterangan-keterangan experimental, tetapi sudah diketahui bahwa terhadap tarikan, sifat-sifat elastisitas untuk kayu tergantung dari keadaan lengas: kayu kering memperlihatkan batas elastisitas yang agak rendah sedangkan dalam kayu dengan kadar lengas tinggi terdapat perubahan bentuk yang permanen pada beban-beban yang kecil pun.
- Belum terdapat banyak keterangan mengenai modulus kenyal kayu dalam tarikan. Hasil-hasil beberapa penyelidikan ternyata bertentangan.
- Hipotesa bernoulli, atau anggapan bahwa dalam balok terlentur tampang-tampang tetap rata mempermudah perhitungan balok terlentur tetapi sebenarnya penyelidikan-penyelidikan memperlihatkan penyimpangan dari linieritas itu.
- Di dalam analisa tegangan-tegangan dan perubahan-perubahan bentuk akibat beban-beban luar pada suatu benda baja, bahan dianggap isotropis, artinya baja mempunyai sifat-sifat elastis yang sama dalam semua arah. Kayu bukan suatu bahan isotropis, sifat-sifatnya tergantung dari arah gaya terhadap arah serat-serat dan cincin-cincin pertumbuhan, tetapi untuk keperluan-keperluan praktis, kayu dapat dianggap ortotropis, artinya mempunyai tiga bidang simetri elastis yang tegak lurus satu pada yang lain yaitu longitudinal, tangensial dan radial, dimana sumbu longitudinal adalah sejajar setar-serat, sumbu tangensial adalah garis-garis singgung





cincin-cincin pertumbuhan dan sumbu radial adalah tegak lurus pada cincin-cincin pertumbuhan.

2.4.1. Untung rugi kayu sebagai bahan konstruksi

Untung rugi pada umumnya dari kayu sebagai bahan konstruksi dapat diuraikan sebagai berikut :

- kayu mempunyai kekuatan yang tinggi dan berat yang rendah, mempunyai daya penahan tinggi terhadap pengaruh kimia dan listrik, dapat mudah dikerjakan, adalah relatif murah, dapat mudah diganti dan bisa didapat dalam waktu singkat.
- Kerugiannya antara lain ialah sifat kurang homogen dengan cacat-cacat alam seperti arah serat yang berbentuk menampang, spiral dan diagonal, mata kayu dan sebagainya. Beberapa kayu bersifat kurang awet dalam keadaan-keadaan tertentu. Kerugian yang lain adalah kayu dapat memuai dan menyusut dengan perubahan-perubahan kelembaban dan meskipun tetap elastis, pada pembebanan berjangka lama sesuatu balok, akan terdapat lendutan yang cukup besar.

Sifat-sifat karakteristik ini memperlihatkan perbedaan-perbedaan penting antara ilmu kayu dan bahan lain yang untuk analisa matematis dalam ilmu kekuatan biasanya diidealisasi sebagai bahan yang sempurna akan homogenitas dan elastisitasnya.

Berhubung dengan kerugian-kerugian tersebut dari kayu, maka konsekuensinya dapat dilihat dalam perhitungan perencanaan, perlunya pengeringan kayu, penggunaan teknik pengawetan, dan sebagainya.

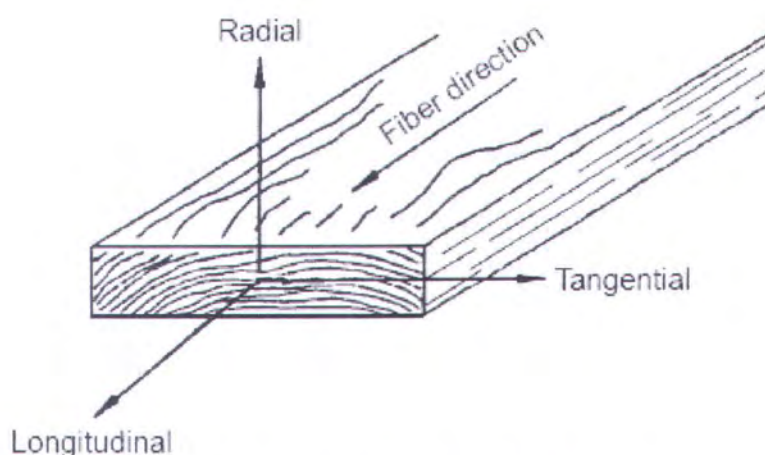


Salah satu sifat kayu yang sering kali dikemukakan sebagai suatu kerugian besar dibandingkan dengan bahan baja dan beton adalah dapat terbakarnya kayu. Memang kayu dapat terbakar tetapi kita maklum bahwa kebakaran-kebakaran hampir selalu dimulai dengan kebakaran didalam ruangan-ruangan dari bahan-bahan yang mudah terbakar, jadi yang penting adalah penghindaran pembakaran bahan-bahan itu. Memang baja tidak dapat terbakar tetapi baja tidak fire resistant (tidak tahan suhu tinggi) kecuali kalau dilindungi pada semua bidangnya dengan bahan yang fire-proofing untuk mengisolir terhadap suhu-suhu kebakaran. Tanpa lindungan-lindungan itu maka batang-batang rangka baja dalam keadaan tekanan sudah akan runtuh pada suhu-suhu kebakaran yang rendah, padahal pada umumnya batang-batang kayu harus sudah terbakar atau menjadi arang hampir seluruhnya sebelum runtuh dan sebelum itu dapat terjadi pada suatu konstruksi kayu biasanya kebakaran sudah dapat dipadamkan. Selain itu kita maklum bahwa sebetulnya kayu dapat juga dibuat fire-proof.

2.4.2. Sifat-sifat mekanis Kayu.⁴

Kayu sebagai material memiliki sifat anisotrop dimana sifat-sifat kayu keberbagai arah tidak sama. Arah disini dibagi menjadi 3 yaitu arah axial (sejajar arah serat), radial (menuju ke pusat), dan tangensial (arah garis singgung). Arah tangensial dan radial tidak memiliki banyak perbedaan maka hanya dua yang diperhitungkan yaitu sejajar arah serat dan tegak lurus arah serat. Hal ini dapat dilihat seperti pada *gambar 2.1* dibawah ini :

⁴ . Wiryomartono, Suwarno (1977)



Gambar 2.1. Three principal axes of wood with respect to grain direction and growth rings.

Adapun sifat-sifat mekanik kayu antara lain :

1. kayu lebih kuat mendukung gaya tarik sejajar arah serat daripada tegak lurus arah serat.
2. menurut arah serat kayu lebih kuat mendukung gaya tarik daripada gaya tekan.
3. kayu lebih kuat mendukung ngaya tekan sejajar arah serat daripada menurut tegak lurus arah serat.
4. kayu lebih kuat mendukung gaya geser tegak lurus arah serat daripada menurut sejajar arah serat. Dan gaya geser tegak lurus ini sedemikian besarnya sehingga jarang sekali terjadi kayu patah karena gaya geser. Umumnya akan timbul retak-retak akibat gaya desak lebih dahulu daripada retak-retak akibat gaya geser tegak lurus arah serat ini.
5. gaya dukung kayu terhadap lenturan akan lebih besar daripada terhadap desakan tetapi lebih kecil terhadap tarikan.



6. kekuatan kayu sebanding dengan banyaknya zat kayu yang dikandung sehingga semakin berat kayu semakin rapat maka semakin besar pula kekuatannya.
7. kadar lengas kayu mempengaruhi kekuatannya dimana semakin kering kayu tersebut maka semakin kuat.

(Wiryomartono, Suwarno. Konstruksi Kayu, 1977)

Secara umum faktor-faktor yang dapat mempengaruhi sifat –sifat mekanis kayu adalah hal-hal sebagai berikut :

- | | |
|-------------------------|-----------------------------|
| - berat jenis | - miring arah serat |
| - kadar lengas | - pohon hidup dan mati |
| - kecepatan pertumbuhan | - pengeringan alam dan oven |
| - posisi cicin tahun | - pengawetan |
| - mata | - keawetan |
| - retak | - lamanya pembebanan |

Banyak penyelidikan telah dilakukan diluar negeri untuk mengetahui korelasi antar faktor-faktor tersebut dan sifat-sifat mekanis, pengetahuan mana yang penting untuk menentukan tegangan-tegangan yang diperkenankan. Kecuali faktor berat jenis, di Indonesia belum dimulai mengenai penyelidikan tersebut sehingga penentuan tegangan-tegangan yang diperkenankan dalam PKKI telah didasarkan hanya atas hasil pengujian *small clear speciment* (contoh-contoh kecil sempurna).

Dalam penggunaan kayu, kita mengenal arti grading (pemilihan). Stresses grading rules ditetapkan khusus berhubung dengan factor-faktor yang



mempengaruhi tegangan ijin. Hasil pengujian small clear specimens dalam laboratorium memberikan basic stresses dalam penentuannya diperhatikan pengaruh lamanya pembebanan, variasi dalam hasil pengujian clear wood suatu jenis, dan suatu angka keamanan (*Safety Factor*). Suatu basic stress adalah suatu working stress untuk clear wood sesuatu jenis, berat jenis dan kadar lengas. Tetapi dalam praktek konstruksi kayu, dalam keadaan “full scale”.

1. grade atau mutu kayu yang dipakai bukan clear wood.
2. keadaan konstruksi tidak sama seperti di laboratorium.

Maka basic stress perlu dikalikan suatu factor yang disebut *strengthratio*, untuk mendapatkan working stresses suatu kayu dan keadaan konstruksi didalam praktek. (*KH Felix, 1991*)

2.4.3. Perubahan Bentuk

Seperti halnya pada pelat baja, kayu memuai jika dipanasi dan menyusut jika didinginkan. Tapi perubahan ukuran karena temperatur saja tidak terlalu besar, yang jauh lebih besar adalah perubahan yang diakibatkan oleh pengaruh kadar air. Antara titik kadar air nol sampai serat jenuh, kayu menyusut jika terjadi pengurangan kadar air dalam serat dan kayu mengembang jika terjadi peningkatan kadar air dalam serat. Diatas titik serat jenuh, tiddak terjadi perubahan ukuran jika terjadi perubahan kadar air.

Perubahan ukuran terjadi paling besar pada arah tangensial, sedikit lebih kecil pada arah radial dan kecil sekali pada arah aksial. Jika massa jenis (ρ) kayu lebih besar maka penyusutan juga akan lebih besar, penyusutan dapat dinyatakan:



$$\text{Penyusutan} = \frac{\text{ukuran setelah dikeringkan} - \text{ukuran sebelum dikeringkan}}{\text{Ukuran sebelum dikeringkan}} \times 100\%$$

Penyusutan pada arah aksial, 0,1 – 0,3 %

Penyusutan pada arah radial, 2 – 8 %

Penyusutan pada arah tangensial, 4,5 – 13 %

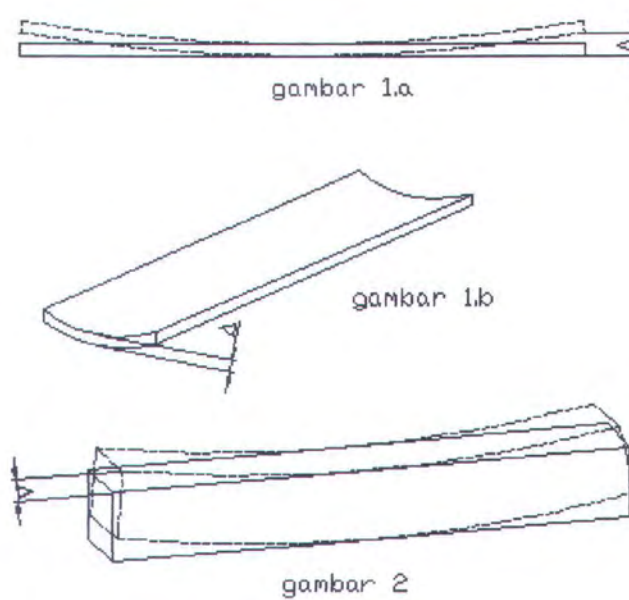
Penyusutan pada arah aksial bisa menjadi lebih besar pada papan atau balok lapis dengan serat yang amat serong. Penyusutan tidak sama pada ketiga arah ini dapat :

- Menyebabkan retak atau pecahnya kayu waktu dikeringkan.
- Menyebabkan perubahan bentuk yang dapat mengurangi kekuatan kayu.

Perubahan ukuran terutama pada arah melintang papan maupun balok yaitu lebar dan tebal, serta hanya sedikit pada arah aksial.

Perubahan bentuk papan dapat digolongkan antara lain :

1. Lengkungan tegak lurus pada papan
 - Aksial.
 - Melintang tangensial.
2. Lengkungan dalam bidang papan pada arah aksial
3. Puntiran memanjang dimana ujung-ujung papan tidak sejajar lagi.



Gambar 2.2. Macam-macam perubahan bentuk pada kayu.

2.5. Konstruksi Kayu Laminasi.⁵

Pada bangunan kapal kayu, untuk konstruksi pada kulit lambung, bangunan atas tidak begitu menjadi persoalan, lain halnya pada konstruksi-konstruksi tertentu seperti linggi, gading besar (web frame) mengingat ukurannya yang besar daripada ukuran kayu tunggal biasa yang ada di pasaran, maka dalam konstruksi tersebut dibuat dalam bentuk konstruksi laminasi.

Dengan adanya konstruksi kayu laminasi tersebut, maka panjang dari konstruksi kayu tersebut sangat tergantung dari cara pengangkutannya dan peralatan yang dipakai untuk pengangkutan konstruksi kayu laminasi tersebut.

Setelah ditemukannya perekat tiruan yang sangat cocok untuk konstruksi-konstruksi tak terlindungi seperti jembatan, bangunan kapal kayu, maka dalam

⁵ . Sadjji, Ir. (1985)



pembangunan konstruksi bangunan tersebut tidak menggunakan kayu tunggal biasa yang berukuran besar tapi dengan menggunakan konstruksi kayu laminasi.

Konstruksi kayu laminasi dapat diartikan sebagai suatu bahan gabungan dari beberapa lapisan kayu yang direkatkan satu sama lain dengan perekat tiruan (*Synthetic*) yang menggunakan mesin penekan hidrolik.

2.5.1. Persyaratan dan Ketentuan Untuk Konstruksi Kayu Laminasi

Beberapa persyaratan dan ketentuan untuk konstruksi kayu laminasi, antara lain:

- Konstruksi kayu laminasi adalah konstruksi kayu yang menggunakan papan-papan tipis yang diletakkan satu sama lain dengan perekat dan arah seratnya sejajar satu sama lain, sehingga merupakan suatu konstruksi kayu yang berukuran lebih besar.
- Tebal papan-papan tipis itu adalah antara 20 sampai 50 mm.
- Kayu berlapis majemuk hanya boleh dibuat oleh suatu pemborong atau laboratorium yang mempunyai ahli dalam konstruksi tersebut.
- Perekat memegang peranan sangat penting sekali pada konstruksi kayu laminasi.
- Kayu yang akan direkatkan harus mempunyai kadar lengas $\leq 15\%$ dan perbedaan kadar lengas antara masing-masing papan kayu harus $\leq 3\%$.
- Konstruksi kayu laminasi yang mempunyai bentuk lengkung, jari-jari lengkungnya harus $\geq 125b$, dimana b adalah tebal dari papan.



2.5.2. Keuntungan Penggunaan Konstruksi Kayu Laminasi

Penggunaan konstruksi kayu laminasi mempunyai keuntungan-keuntungan antara lain :

1. Dapat dibuat penampang dan panjang yang lebih besar dari balok tunggal biasa.
2. Kayu yang bukan kayu konstruksi dapat dipergunakan untuk membentuk suatu penampang yang sama kuatnya atau lebih kuat daripada balok tunggal biasa.
3. Pelapisan dapat disusun sedemikian sehingga bagian-bagian yang mendapat tegangan-tegangan terbesar memuat kualitas yang lebih tinggi.
4. Suatu busur dari konstruksi kayu laminasi lebih tahan kebakaran daripada suatu konstruksi kayu batang.
5. Dalam bowstring trusses, busur batang tepi atas dapat dibuat menerus pada titik-titik panil sehingga juga memudahkan pembuatan.

2.5.3. Kerugian Pemakaian Konstruksi Kayu Laminasi

Kerugian dalam penggunaan kayu laminasi pada konstruksi antara lain :

1. Persiapan untuk membuat konstruksi kayu laminasi pada umumnya memerlukan biaya yang lebih besar dari pada konstruksi kayu tunggal biasa (solid timber)
2. Kekuatan dari kayu laminasi tergantung kekuatan sambungan (perekatnya) maka pembuatannya memerlukan alat-alat khusus yang sangat berbeda dengan peralatan konstruksi kayu biasa sehingga diperlukan pengawas dari orang-orang yang ahli.



3. Kesukaran dalam pengangkutan dari bagian/komponen konstruksi lebih-lebih untuk konstruksi pelengkung.
4. Diperlukannya pengawasan khusus dalam pembuatan oleh orang-orang yang berpengalaman pada kayu laminasi.

2.5.4. Perbedaan Konstruksi Kayu Laminasi Dengan Konstruksi Plywood

Konstruksi kayu laminasi berbeda dengan konstruksi plywood, dan perbedaannya tergantung cara penyusunan lapisan masing-masing papan yaitu antara lain:

- Pada konstruksi kayu laminasi arah serat sama, sedang pada plywood arah serat papan saling tegak lurus.
- Jarak sambungan atau letak sambungan tidak diperkenankan pada satu baris.
- Pada konstruksi kayu laminasi, adanya sambungan papan-papan akan mempengaruhi kekuatan dari konstruksi tersebut.

2.5.5. Pengaruh Lengkungan Dan Tebal Lapisan Papan

Pada setiap konstruksi yang mempunyai bentuk lengkung seperti Parabola Tembereng, Tangensial, semacam konstruksi gading besar, bilga keel, linggi, dan lain sebagainya akan timbul kemungkinan bahaya retak pada lengkungan papan-papan sehingga dalam perencanaan didaerah lengkungan ada persyaratan bahwa jari-jari lengkungan harus $\geq 125 b$ untuk kelas kayu keras dan harus $\geq 100 b$ untuk kelas kayu lunak, dimana b adalah tebal dari papan kayu.



Bila masing-masing papan dibengkokkan untuk mendapatkan lengkungan yang dikehendaki, timbullah tegangan yang sebanding besarnya lengkungan walaupun sebagian besar dari pada tegangan ini kemudian akan hilang, sebagian masih tetap ada sehingga hal ini mengurangi kekuatan lapisan kayu. Sehingga dalam perhitungan konstruksi kayu laminasi untuk konstruksi melengkung terdapat faktor-faktor lengkung untuk tegangan yang diperhitungkan terhadap konstruksi balok lurus.

Pada balok yang melengkung yang dibebani momen akan timbul tegangan dalam arah radial yang tegak lurus terhadap arah serat. Tegangan ini timbul adanya gaya lintang yaitu dimana tegangan maksimum terdapat pada garis netral dari potongan balok konstruksi. Tegangan arah radial ini kecil sekali sehingga praktis dalam perhitungan dapat diabaikan.

2.6. Perekat Konstruksi Kayu Laminasi.⁶

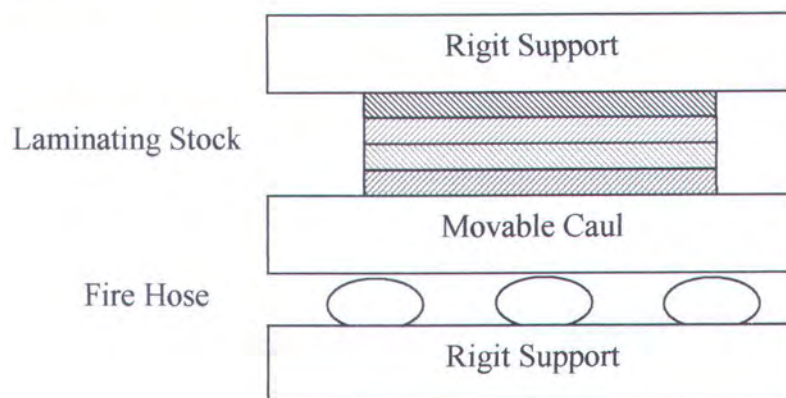
Pelaksanaan pembuatan konstruksi kayu laminasi harus mempunyai peralatan yang baik untuk mencampur dan melumurkan perekat, untuk memelihara suhu yang dibutuhkan, dan untuk menggunakan tekanan yang dibutuhkan. Tiap lapisan biasanya dilumurkan dengan perekat pada kedua sisinya dengan alat pelumuran mekanis atau dengan tangan. Jika konstruksi berbentuk pelengkung maka perlu lapisan-lapisan dilentur keliling suatu konstruksi cetakan yang sesuai. Pengempaan dilaksanakan menurut urutan kesempurnaan, dengan :

- mesin penekan hidrolis.
- Alat-alat pengapit dengan baut atau sekrup (klem).

⁶ . Steward, Robert M. (1994)

Untuk mempercepat pengerasan atau jika proses pengerasan perekat yang dipakai membutuhkan suhu yang lebih tinggi daripada suhu ruang, maka konstruksi-konstruksi diletakan di dalam ruangan khusus di mana suhu dapat dinaikan menurut kebutuhan, sedangkan untuk menjaga dan mengontrol kadar lengas kayu ruangan itu diberi penabur air atau uap air. Pemanasan dengan tenaga berfrekuensi tinggi dapat dibedakan :

- Pemanasan sejajar (glue line heating)
- Pemanasan tegak (transverse heating)
- Pemanasan terpencah (stay field heating)



Gambar 2.3. Cross-sectional plan of firehose press

2.6.1. Metode Perekatan

Papan-papan yang disusun agar menjadi konstruksi kayu laminasi dibutuhkan lem /perekat untuk merekatkan papan-papan tersebut. Didalam perekatan harus diperhatikan adanya daya tarik menarik antara perekat dengan benda yang direkat serta daya tarik menarik yang ada didalam perekat itu sendiri. Jadi merekatnya dua benda yang direkat adalah karena gaya tarik menarik tersebut.



Syarat suatu perekat adalah adanya gaya tarik menarik didalam perekat itu sendiri yang kuat baik bersifat polymer (perekat buatan) atau perekat sintesis.

Ikatan permukaan antara perekat dengan benda yang direkatkan ini dapat terjadi karena :

1. Perekatan mekanis, yaitu perekatan terjadi dengan masuknya cairan perekat kedalam poro-pori pada permukaan benda yang akan direkat, yang kemudian perekat tersebut akan mengeras didalam pori-pori tersebut.
2. Perekatan spesifik, yaitu perekatan yang terjadi karena adanya gaya tarik menarik antara molekul perekat dengan benda yang direkat. Pada perekatan spesifik terjadi ikatan secara kimia antara perekat dengan permukaan benda yang direkat, ikatan ini merupakan ikatan yang kuat. Pada perekat sintesis umumnya perekatan yang terjadi adalah perekatan spesifik.

2.6.2. Jenis-jenis Perekat

Jenis-jenis perekat yang dapat digunakan pada konstruksi komposit kayu laminasi adalah sebagai berikut .:

1. Perekat fenol formeldehid, termasuk perekat termoset dan ini merupakan resin kental dengan katalis asam cairnya. Proses settingnya polimerisasi kondensasi dengan eliminasi air, tahan cuaca, air panas dan mikroba. Pemakaian untuk kayu laminasi cocok untuk penggunaan luar.



2. Perekat fenolik, termasuk perekat termoset dan jenis perekat ini tahan cuaca, mendidih, yang paling awet dan tahan mikroba.

Jenis dari perekat fenolik yaitu :

- Perekat fenolik Neopren.
 - Perekat fenolik Nitril.
 - Perekat fenolik Poliamide.
 - Perekat fenolik Vinil butiral.
 - Perekat fenolik Vinil formal.
3. Perekat urea formaldehyde, termasuk resin termoset sintetik ini terdapat sebagai sistem dua bagian terdiri atas resin dan zat pengeras (*hardener*). Proses settingnya polimerisasi kondensasi dengan eliminasi air. Perekat ini cocok digunakan untuk pengeleman kayu (kelembababan 7 – 15 %).

Tabel 2.1 Tabel macam-macam perekat dalam konstruksi kayu antara lain:

No	Macam perekat	Bentuk dalam perdagangan	Cocok untuk bangunan
1.	Casein	Tepung	Yang terlindung seperti kuda-kuda rumah dan sebagainya.
2.	Urea formaldehyde resin	Cairan atau tepung dengan zat pengeras	Yang terlindung, dimana warna perlu diutamakan
3.	Resorcinol resin	Cairan dengan zat pengeras	Yang tidak terlindung seperti jembatan, stadion, bangunan kapal, dan lain sebagainya



4.	Phenolic resin	Cairan dengan zat pengeras	Yang tidak terlindung seperti jembatan, stadion, bangunan kapal, dan lain sebagainya
----	----------------	----------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------

Tabel 2.1 Tabel Macam-macam Perekat Dalam Konstruksi Kayu Laminasi

2.6.3. Percampuran Perekat (Glue Mixing)

Pembuatan campuran perekat yang telah ditentukan komposisinya dan mencampur perekat didalam tabung resin atau *glue mixer*. Campuran perekat dalam glue mixer diaduk hingga rata antara resin dan hardener, dan bila sudah rata diambil sedikit sample untuk diperiksa kekentalannya, berat jenisnya, serta kadar airnya. Pengadukan campuran perekat ini berlangsung ± 15 menit atau lebih tergantung perekat dan kekentalan yang diinginkan.

Perbandingan perekat untuk jenis *epoxy resin* yaitu satu berbanding satu dimana satu bagian untuk resin dan satu bagian untuk pengeras (*hardener*) atau satu untuk resin dan dua untuk pengeras (*hardeneer*) guna mendapatkan campuran yang memiliki kecepatan pengeringan/pengerasan pengeleman lebih baik.

Hal-hal yang perlu diperhatikan pada waktu pencampuran perekat yaitu :

1. Tangki-tangki setelah dipakai harus cepat-cepat dibersihkan dengan air panas.
2. Komposisi perekat harus sesuai dengan ketentuan yang ada.
3. Waktu penggunaan perekat agar dijaga tidak sampai berceceran.
4. Pada tangki pengadukan harus dijaga agar jangan ada kotoran-kotoran yang tertinggal.



5. Memasukkan bahan-bahan perekat harus dengan hati-hati dan perlahan-lahan.
6. Setelah diaduk agar dicek kerataan campuran.
7. *Hardener* adalah bagian terakhir yang dimasukkan dalam campuran.
8. Kebersihan dalam *glue mixer* harus dijaga.
9. Mesin pengaduk atau manual harus selalu mengaduk atau berputar jika perekat tidak digunakan secara langsung bersamaan agar tidak terjadi pengerasan dini didalam tangki pengadukan.

2.7. Perhitungan Dengan Metode Elemen Hingga.⁷

Metode elemen hingga adalah metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan persoalan-persoalan teknik (*engineering*) dan rangkaian (*continuum*). Untuk permasalahan yang menyangkut geometri, pembebanan dan sifat material yang kompleks, penyelesaian dengan matematika analitis adalah tidak dimungkinkan. Solusi analitis diberikan dengan ekspresi matematis yang menghasilkan harga dari suatu besaran yang tidak diketahui pada sebarang lokasi dari sebuah struktur. Solusi analitis ini memerlukan penurunan persamaan diferensial parsial yang biasanya pada struktur rumit tidak bisa didapatkan. Selain itu untuk menyelesaikan persamaan matematis (persamaan diferensial yang linear maupun non-linear) untuk keseluruhan struktur, adalah pekerjaan yang sulit. Hanya persoalan yang menyangkut geometri sederhana (kotak dan segitiga) yang bisa diselesaikan dengan metode analitis. Oleh karena itu metode numerik adalah salah satu cara untuk menyelesaikan permasalahan diatas.

⁷. Syafiudin (2004)



Prinsip yang digunakan dalam metode elemen hingga adalah membagi suatu struktur kedalam elemen-elemen kecil. Kemudian perhitungan dilakukan untuk tiap elemen tersebut. Untuk memperoleh hasil pada keseluruhan struktur, hasil perhitungan elemen tersebut kemudian digabung. Proses pembagian struktur ini disebut dengan *diskritisasi*. Disebut elemen hingga karena elemen ini meskipun kecil, mempunyai ukuran atau berhingga.

Dalam persoalan analisa tegangan, perhitungan dilakukan untuk menentukan tegangan maksimum yang terjadi pada struktur akibat adanya beban yang bekerja. Tegangan yang didapatkan ini kemudian dibandingkan dengan tegangan yang diijinkan untuk memastikan struktur dalam kondisi yang aman. Saat ini penyelesaian menggunakan metode elemen hingga sudah tidak dilakukan secara manual, sebab selain menyita banyak waktu, penyelesaian secara manual mempunyai resiko kesalahan yang besar. Oleh karena itu digunakan program komputer (*software*) untuk memperoleh hasil yang lebih akurat dan lebih cepat.

MSC/NASTRAN, ANSYS dan ABAQUS adalah *software* analisa struktur kelas dunia yang paling banyak digunakan, dan ketiga software ini menggunakan prinsip metode elemen hingga. Dalam tugas akhir ini *software* yang digunakan adalah **MSC/NASTRAN for Windows Version 4.5**. NASTRAN (*NASA STRuctural ANalysis*) pertama kali dikembangkan oleh NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) pada tahun 1966. Kemudian sejak tahun 1971 versi lain dari *software* ini dikembangkan dan dipasarkan secara luas oleh MSC (*MacNeal-Schwendler Corporation*) dan diberi nama MSC/NASTRAN .



Tahapan dalam Metode Elemen Hingga secara umum yang digunakan untuk memformulasikan FEA (*finite Element Analysis*) dalam berbagai tipe analisis, baik itu analisa struktur, perpindahan panas (*heat transfer*), aliran fluida (*fluid flow*) serta analisa yang lain adalah sama. Tahapan tersebut dikelompokkan atas tiga bagian utama, yaitu tahap awal (*preprocessing*), tahap perhitungandan analisis (*solution*) dan tahap akhir (*postprocessing*).

2.7.1. Tahap Awal (*preprocessing*)

Tahap awal ini adalah tahap dalam pendefinisian model elemen hingga (*finite element model*) yang terdiri atas beberapa tahapan diantaranya:

- Pemilihan tipe elemen yang akan digunakan
- Pendefinisian sifat-sifat material
- Pendefinisian sifat geometri/dimensi yang meliputi panjang, luas dan penampang melintang
- Diskritisasi atau pembagian elemen (*meshing*)
- Pendefinisian beban dan
- Pendefinisian *constraints*.

Pemilihan tipe elemen tergantung pada bentuk fisik dari pada struktur. Tipe elemen terbagi atas empat bentuk yaitu:

- a. Elemen satu dimensi, disebut juga dengan elemen garis

Elemen ini terdiri atas *bar/truss*, *beam* dan *bend element*. Elemen ini dibentuk dengan menghubungkan dua titik (*grid point*) dan ujung-ujung elemen diberi label *end A* dan *end B*. Elemen ini biasanya digunakan untuk memodelkan



struktur rangka. Elemen ini memiliki luas penampang, namun hanya diwakilkan oleh segmen garis. Elemen ini memiliki dua simpul yang terletak di ujung-ujung elemen.

b. Elemen dua dimensi, disebut juga dengan elemen bidang

Elemen yang paling banyak digunakan dalam pemodelan elemen dua dimensi adalah elemen segitiga dan elemen segi empat. Elemen dua dimensi yang sederhana hanya memiliki simpul sudut (*corner nodes*), sedangkan elemen dua dimensi yang lebih kompleks memiliki simpul tengah (*midside nodes*) dan disebut dengan *quadratic elements*. Elemen ini bisa memiliki ketebalan yang konstan atau bisa bervariasi.

c. Elemen tiga dimensi

Elemen yang paling banyak digunakan adalah *hexahedral*, *tetrahedral* dan *pentahedral element*. Elemen ini disebut juga dengan elemen solid dan digunakan ketika akan melakukan analisa tegangan tiga dimensi.

d. Elemen *axisymmetric*.

Elemen ini dibuat dengan memutar elemen bidang terhadap sumbu yang terletak pada bidang elemen sejauh 360° . Elemen ini bisa digunakan jika geometri dan pembebanan adalah *axisymmetric*.

Element dimension	Elements
0	CONM, ELAS, GENEL, MASS, RBE
1	BAR, BEAM, BEND, ROD
2	QUAD, SHEAR, TRIA
3	HEXA, PENTA, TETRA, TRIAX

Tabel 2.2 Tipe elemen yang dipakai didalam MSC/NASTRAN



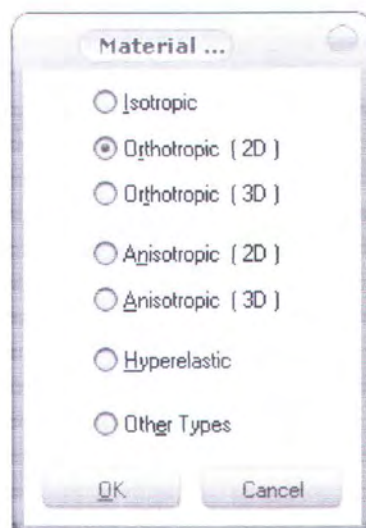
Pembuatan geometri model didalam MSC/NASTRAN bisa di-import dari program lain berbasis CAD (*Computer Aided Design*) seperti AutoCAD, maupun dibuat secara langsung menggunakan aplikasi FEMAP (*Finite Element Modeling and PostProcessing*) yang sudah terintegrasi didalamnya. Untuk membuat geometri model secara langsung, bisa menggunakan fasilitas (*toolbars*) yang sudah ada. Tiap kelompok *underlying toolbars* juga terdiri atas beberapa kelompok *toolbar*.

Dalam mendefinisikan sifat-sifat material, kita bisa memasukkan data material dari tabel material, atau bisa memilih material standar yang ada pada *material libraries*, sehingga material bisa dipilih yang sesuai dengan keinginan kita. Tipe material yang bisa digunakan dalam MSC/NASTRAN ada tujuh macam yaitu: *isotropic*, *orthotropic* (2D), *orthotropic* (3D), *anisotropic* (2D), *anisotropic* (3D), *hyperelastic* (*Mooney-Rivlin/Polynomial form*) dan tipe yang lain.

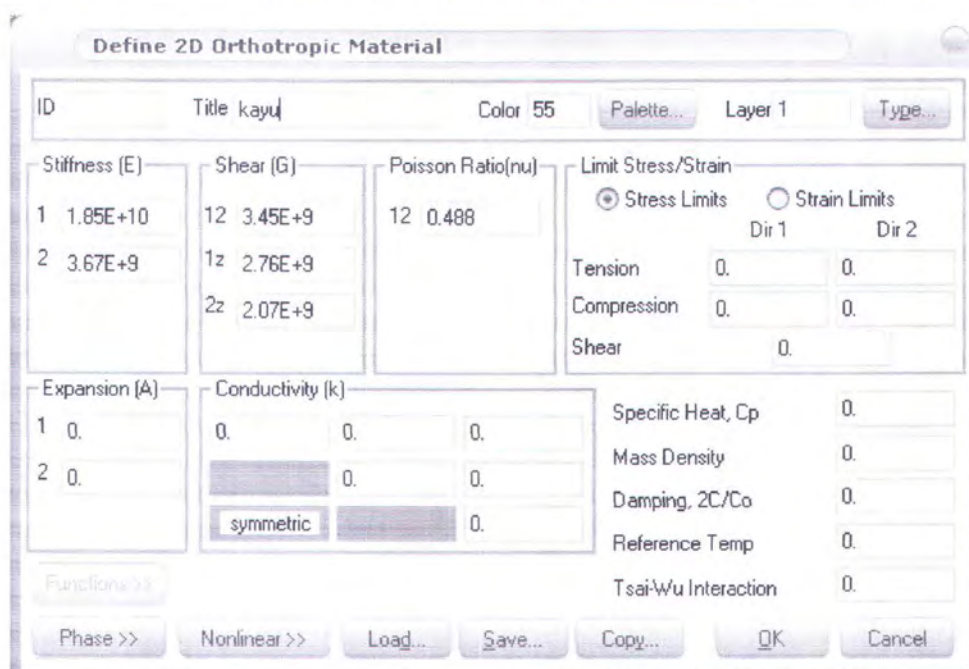
Sifat-sifat material isotropik, termasuk kekuatan dan kekakuannya tidak tergantung pada arah beban yang bekerja. Sedangkan sifat-sifat material anisotropik adalah tergantung pada arah pembebanan, serta akan menghasilkan tegangan dan regangan yang berbeda pada pembebanan yang berbeda. Sifat material ortotropik adalah sama dengan material anisotropik, namun pembebanan pada bidang ortogonal akan menghasilkan harga yang ekstrim. Sedangkan jenis kayu adalah jenis material orthotrop dimana sifat material ini tergantung dari arah seratnya. Diantara beberapa jenis material diatas, material orthotrop adalah jenis material yang jarang dilakukan perhitungan analisa struktur.



Material 2D hanya bisa digunakan pada elemen bidang dan material 3D hanya digunakan pada elemen solid. Untuk material orthotrop 2D data material yang harus didefinisikan terdiri atas modulus elestisitas kearah sumbu X (E_x), modulus elestisitas kearah sumbu Y (E_y), modulus geser kearah sumbu X (G_x), modulus geser kearah sumbu Y (G_y), modulus geser kearah sumbu Z (G_z), angka Poisson (ν), kerapatan massa (*density*), dan koefisien ekspansi termal.



Gambar 2.4 Tipe material yang bisa digunakan dalam MSC/NASTRAN



Gambar 2.5. Definisi Tipe Material Orthotrop 2D dalam MSC/NASTRAN



Setelah model elemen hingga selesai dibuat, tahap selanjutnya adalah mendefinisikan *constraint* yang bekerja pada struktur. Pendefinisian *constraint* bisa dilakukan dalam tiga bentuk yaitu *nodal constraint* (NC), *geometry based constraint* (GBC) dan *constraint equation* (CE). Tiap simpul pada elemen mempunyai enam derajat kebebasan, DOF (*degree of freedom*), yakni translasi kearah sumbu X, Y, Z dan rotasi terhadap sumbu X, Y, Z. *Nodal constraint* sifatnya fleksibel, sebab dimungkinkan untuk mengatur perpindahan keenam DOF untuk menggambarkan keadaan struktur yang sebenarnya. Sedangkan pada *geometry based constraint* kita bisa memilih titik, kurva dan *surface* sebagai acuan. Jenis *constraint* ini hanya memiliki tiga pilihan yaitu *fixed*, *pinned* dan *no rotations*. *Constraint equation* tidak memberikan harga nol pada DOF, namun ia menghubungkan perpindahan atau displasemen pada derajat kebebasan yang berbeda.

Pendefinisian beban didalam MSC/NASTRAN bisa dilakukan dalam berbagai bentuk seperti halnya pada saat pendefinisian *constraint*. Tipe beban yang digunakan antara lain:

- *Body loads*, yang terdiri atas percepatan, kecepatan dan termal.
- *Nodal loads*, yang terdiri atas gaya/momen, displasemen, kecepatan, temperatur, *heat generatio* (energi panas/unit volume) dan *heat flux* (energi panas/unit luas).
- *Elemental loads*, terdiri atas beban merata, tekanan, temperatur, panas (*heat*), konveksi dan radiasi.



- *Geometry based loads*, terdiri atas titik, garis dan permukaan.

Pembebanan yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah beban simpul yang berupa gaya.

2.7.2. Tahap Perhitungan dan Analisis (*solution*)

Setelah model elemen hingga selesai dibuat, tahap selanjutnya adalah tahap perhitungan model. Tahap ini merupakan tahapan yang dikerjakan oleh *software* secara otomatis ketika model di-*analyze*. Tahap ini terdiri atas:

- Perhitungan matrik kekakuan tiap elemen k dan persamaannya

$$\{f\} = [k] \{d\} \quad (2.7-1)$$

- Menggabungkan matrik kekakuan tiap elemen sehingga menjadi matrik kekakuan global K , dimana:

$$[K] = \sum_{e=1}^N [k^{(e)}] \quad (2.7-2)$$

- Menggabungkan beban menjadi vektor beban global F dan menentukan kondisi batas (*boundary condition*) pada keseluruhan struktur berdasarkan *constraint* yang sudah didefinisikan pada tahap awal.
- Menyelesaikan persamaan global yang selanjutnya digunakan untuk perhitungan lebih lanjut, seperti menghitung tegangan dan regangan.

$$\{F\} = [K] \{d\} \quad (2.7-3)$$



Tipe analisis yang digunakan tergantung pada permasalahan dan kondisi struktur yang akan dianalisa. Tabel 2.2 merangkum berbagai macam tipe analisis yang bisa digunakan.

Analysis Type	SOL Name	SOL #	Description
Static	SESTATIC	101	Linear Statics with Options
Nonlinear Static	NLSTATIC	106	Nonlinear or Linear Statics
Normal Modes / Eigenvalue	SEMODES	103	Normal Modes
Transient Dynamic / Time History	SEDTRAN	109	Direct Transient Response
	SEMTRAN	112	Modal Transient Response
Frequency / Harmonic Response	SEDFREQ	108	Direct Frequency Response
	SEMFREQ	111	Modal Frequency Response
Response Spectrum	SEDTRAN	109	Response Spectrum Generation
Random Response	SEMFREQ	111	Random Response Analysis
Buckling	SEBUCKL	105	Buckling
Nonlinear Transient Response	NLTRAN	129	Nonlinear or Linear Transient Response
Steady-State Heat Transfer	NLSCSH	153	Steady State Heat Transfer Analysis & Options: Linear or Nonlinear Analysis
Transient Heat Transfer	NLTCSH	159	Transient Heat Transfer Analysis & Options: Linear or Nonlinear Analysis
Design Optimization	DESOPT	200	Sizing Design Optimization

Tabel 2.3 Tipe analisis yang dipakai didalam MSC/NASTRAN

2.7.3. Tahap Akhir (*postprocessing*)

Tahap ini merupakan tahap dalam mengolah hasil yang diperoleh setelah model dianalisis. Tahap pertama yang dilakukan adalah mendefinisikan tipe plot yang diinginkan dan data yang digunakan dalam tampilan (*display*). Bentuk *deformed* dan *contour* pada tampilan ini bisa diatur menggunakan **View | Select**. Pemilihan data yang akan digunakan bisa dipilih melalui kotak dialog **PostProcessing Data**. Kotak dialog ini bisa mengontrol *output set* dan *output*



vector yang akan ditampilkan. Pekerjaan yang dilakukan pada tahap akhir ini meliputi:

- Pengolahan hasil yang diperoleh yang terdiri atas *contour plot*, *deformation plot*, animasi, X-Y plot dan lain-lain.
- Persiapan format tampilan dan
- Penyusunan ringkasan hasil analisis.

2.8. Mekanika Komposit.²

Dalam menganalisa karakteristik komposit terdapat dua macam konsep pemahaman yaitu :

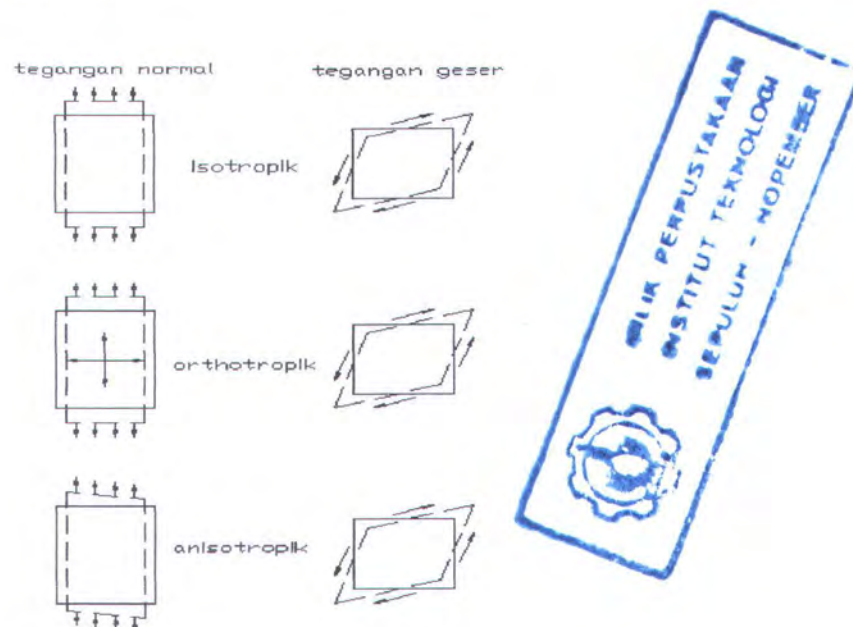
1. Tinjauan secara mikromekanik.
2. Tinjauan secara makromekanik.

Dalam tinjauan secara mikromekanik, yang dilihat adalah komposit merupakan material yang tersusun atas matrik dan serat sehingga analisa kekuatan komposit didasarkan pada kekuatan matrik dan serat pembentuknya. Sedangkan tinjauan secara makromekanik yang dilihat adalah bahwa komposit sebagai suatu material yang utuh sehingga analisa kekuatan komposit didasarkan pada kekuatan tiap-tiap laminasi atau lapisan yang membentuknya.

Material komposit merupakan material yang nonhomogen dan anisotrop. Material nonhomogen artinya material tersebut mempunyai sifat yang tidak merata, sedangkan material anisotrop artinya material tersebut mempunyai sifat yang tidak sama dalam segala arah.



Sifat anisotrop pada material komposit menunjukkan tingkah laku mekanik yang sangat berbeda dengan material konvensional. Tingkah laku material isotropic, orthotropic, dan anisotropic jika dikenai beban uniaksial dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.6. Perubahan Mekanika Material

Untuk material isotropic tegangan normal menyebabkan perpanjangan pada arah dimana tegangan tersebut bekerja dan kontraksi pada arah tegak lurus tegangan. Demikian juga tegangan geser hanya menyebabkan deformasi geser.

Untuk material orthotropic seperti pada isotropic tegangan normal arah principal menghasilkan perpanjangan pada arah tegangan tersebut bekerja dan kontraksi tegak lurus dengan tegangan, akan tetapi ada perbedaan sifat pada dua arah principal. Kontraksi dapat lebih atau kurang daripada kontraksi dengan pembebanan yang sama dengan modulus elastisitas yang sama pada material isotropic seperti pada arah pembebanan. Tegangan geser menyebabkan deformasi



geser tetapi besar deformasi geser tidak tergantung dari variasi modulus young dan poisson rasio.

Untuk material anisotropic tegangan normal tidak hanya menyebabkan perpanjangan pada arah tegangan tersebut bekerja dan kontraksi tegak lurus padanya akan tetapi terlihat deformasi geser, sebaliknya tegangan geser menyebabkan perpanjangan dan kontraksi bertambah pada distorsi deformasi geser.

2.8.1. Hubungan Tegangan Dan Regangan Untuk Plane Stress Pada Material Orthotrop⁸.

Material komposit memiliki banyak karakteristik yang berbeda terhadap material konvensional. Ada beberapa karakteristik yang memiliki kesamaan dengan material konvensional dan ada pula yang berbeda sama sekali. Untuk material orthotropy ini memiliki hubungan antara regangan dan tegangan sebagai berikut :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.8-1)$$

Dapat diperhatikan disini bahwa tidak terdapat interaksi antara tegangan normal σ_1 , σ_2 , dan σ_3 dengan regangan geser γ_{23} , γ_{31} , dan γ_{12} . Juga tidak terdapat interaksi tegangan geser dengan regangan normal serta tidak ada interaksi antara

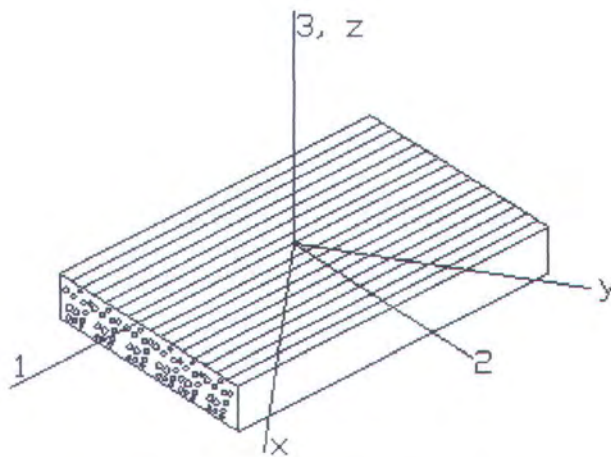
⁸ . Gibson, Ronald F (1994)



tegangan geser yang satu dengan yang lainnya bidang yang berbeda. Dapat diperhatikan terdapat sembilan konstanta independent yang terdapat pada material jenis ini.

2.8.2. Matrik Kekakuan Bahan Komposit⁸

Pada analisa secara makromekanik, laminasi diasumsikan bahan laminasi sebagai pelat datar tipis yang terletak pada sumbu x dan sumbu y (dua dimensi). Untuk sebuah laminasi pada kondisi *plane stress*, σ dan ϵ satu bidang (pada bidang 1-2) yang ditunjukkan pada *gambar 2.5* dimana kondisi tegak pada bidang 3 dapat didefinisikan $\sigma_3 = 0$, $\sigma_{23} = 0$, $\epsilon_{31} = 0$



gambar 2.7. Orthotropik laminasi dengan prinsip koordinat.

Hubungan antara tegangan dan regangan (kekakuan) dapat di definisikan sebagai suatu persamaan yang dapat ditulis sebagai berikut :

$$\epsilon = [S][\sigma] \quad (2.8-2)$$

matrik compliance [S]



$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.8-3)$$

dimana :

S = complience

$$S_{11} = 1/E_1$$

$$S_{22} = 1/E_2$$

$$S_{12} = -\nu_{12}/E_1 = -\nu_{21}/E_2$$

$$S_{66} = 1/G_{12}$$

ε_1 = regangan longitudinal

ε_2 = regangan transversal

γ_{12} = regangan geser pada bidang -1 arah -2

σ_1 = tegangan longitudinal

σ_2 = tegangan transversal.

τ_{12} = tegangan geser pada bidang -1 arah -2

S_{ij} = matrik complience

E_1 = Modulus Elastisitas longitudinal

E_2 = Modulus Elastisitas transversal

G_{12} = Modulus geser pada bidang -1 arah -2

ν_{12} = Poisson rasio arah longitudinal

ν_{21} = poisson rasio arah transversal

Atau dapat ditulis dalam bentuk matrik dengan menggunakan matrik reduced stiffness sebagai berikut :



$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.8-4)$$

dimana :

$$Q_{11} = \frac{S_{22}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

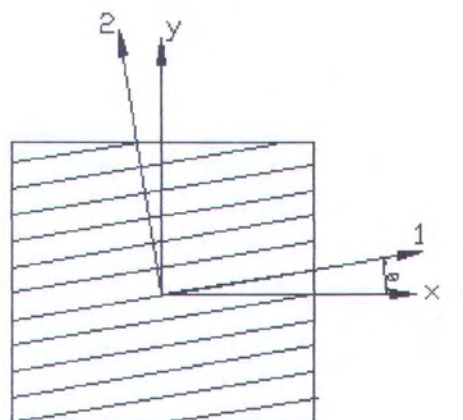
$$Q_{12} = \frac{S_{12}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = Q_{21}$$

$$Q_{22} = \frac{S_{11}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{66} = \frac{1}{S_{66}} = G_{12}$$

2.8.3. Transformasi Matrik Kekakuan

Hubungan antara tegangan dan regangan pada material laminasi dengan sudut serat yang berbeda, dan berlaku pada perbedaan yang searah dengan orientasi sudut serat. Untuk itu perlu ditransformasikan menjadi arah yang sesuai dengan sumbu yang digunakan.



Orientasi sudut serat

Gambar 2.8. Gambar Orientasi sudut serat



Untuk kasus *plane stress*, transformasi tegangan dari sumbu x,y kesumbu y 1-2 dapat dicari dalam bentuk matrik transformasi.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.8-5)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.8-6)$$

dengan matrik transformasi $[T]$ untuk semua kasus dua dimensi

dimana : $C = \cos \theta$

$S = \sin \theta$

$$T = \begin{bmatrix} C^2 & S^2 & 2SC \\ S^2 & C^2 & -2SC \\ -SC & SC & C^2 - S^2 \end{bmatrix} \quad (2.8-7)$$

Sedangkan invers dari T adalah :

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} C^2 & S^2 & -2SC \\ S^2 & C^2 & 2SC \\ SC & -SC & C^2 - S^2 \end{bmatrix}$$

maka hubungan tegangan regangan yang terjadi pada arah yang berubah-ubah jika ditransformasikan kedalam sumbu koordinat (x,y) dalam bentuk matrik dinyatakan oleh :

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [\overline{Q}] \dots \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.8-8)$$

dan transformasi kekakuan $[\overline{Q}]$ adalah :



$$[\bar{Q}] = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{13} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{23} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}$$

dimana :

$$\bar{Q}_{11} = Q_{11} \cos^4 \theta + Q_{22} \sin^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta$$

$$\bar{Q}_{12} = (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{12} (\cos^4 \theta + \sin^4 \theta)$$

$$\bar{Q}_{22} = Q_{11} \sin^4 \theta + Q_{22} \cos^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta$$

$$\bar{Q}_{16} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos^3 \theta \sin \theta - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos \theta \sin^3 \theta$$

$$\bar{Q}_{26} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos \theta \sin^3 \theta - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos^3 \theta \sin \theta$$

$$\bar{Q}_{66} = (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{66} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta)$$

Dalam alternative yang lain dapat menggunakan matrik sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [\bar{S}] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.8-9)$$

dimana matrik transformasi compliance $[\bar{S}]$ adalah :

$$[\bar{S}] = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix}$$

dimana :

$$\bar{S}_{11} = V_1 + V_2 \cos 2\theta + V_3 \cos 4\theta$$

$$\bar{S}_{12} = V_4 - V_3 \cos 4\theta$$

$$\bar{S}_{22} = V_1 - V_2 \cos 2\theta + V_3 \cos 4\theta$$

$$\bar{S}_{16} = V_2 \sin 2\theta + 2V_3 \sin 4\theta$$



$$\bar{S}_{26} = V_2 \sin 2\theta - 2V_3 \sin 4\theta$$

$$\bar{S}_{66} = 2(V_1 - V_4) - 4V_3 \cos 4\theta$$

$$V_1 = \frac{1}{8}(3S_{11} + 3S_{22} + 2S_{12} + S_{66})$$

$$V_2 = \frac{1}{2}(S_{11} - S_{22})$$

$$V_3 = \frac{1}{8}(S_{11} + S_{22} - 2S_{12} - S_{66})$$

$$V_4 = \frac{1}{8}(S_{11} + S_{22} + 6S_{12} - S_{66})$$

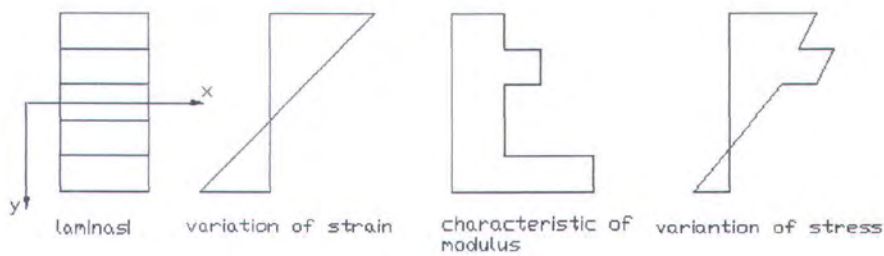
2.8.4. Analisa Tegangan Regangan Pada Material Komposit Laminasi⁸

Tinjauan kekuatan komposit secara makromekanik pada laminasi didasarkan atas asumsi bahwa lapisan-lapisan yang menyusun laminat saling terikat kuat satu dengan yang lainnya, dengan demikian tidak terjadi regangan geser, tidak terjadi slip dan deformasi yang kontinyu pada setiap lapisan. Dengan asumsi diatas maka komposit dapat dianggap sebagai suatu pelat dari lapisan-lapisan yang menyusun komposit tersebut merupakan satu kesatuan utuh sehingga analisa kekuatan komposit didasarkan pada kekuatan secara keseluruhan yang menyebar merata keseluruh laminat.

Dari analisa diatas maka dapat dinyatakan persamaan hubungan tegangan dengan regangan pada lapisan 1 ke-k yang menyebabkan terjadinya regangan dan kelengkungan bidang tengah pada komposit sebagai berikut

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.8-10)$$

Karena Q_{ij} dapat berbeda-beda untuk setiap layer pada laminasi maka variasi tegangan pada laminasi tidak linier tetapi regangan linier. Hal ini dapat dilihat pada *gambar 2.9*.



Gambar 2.9. Variasi σ dan ε terhadap ketebalan laminasi.

2.8.5. Resultan Gaya Dan Momen Pada Kontruksi Laminasi.⁸

Resultan gaya dan momen diperoleh dengan mengintegrasikan tegangan dan regangan pada setiap layer atau lapisan sepanjang ketebalannya. Sehingga akan diperoleh gaya persatuan panjang lebar (N) dan momen persatuan lebar (M) dengan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{16} & Q_{26} & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} dz + \int_{2k-1}^{zk} \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} z dz \quad (2.8-11)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{16} & Q_{26} & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} dz + \int_{2k-1}^{zk} \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} z^2 dz \quad (2.8-12)$$

Oleh karena $\varepsilon_x^0, \varepsilon_y^0, \gamma_{xy}^0, k_x, k_y, k_{xy}$ bukan merupakan fungsi z tetapi merupakan fungsi bidang tengah maka persamaan diatas menjadi :



Oleh karena $\varepsilon_x^0, \varepsilon_y^0, \gamma_{xy}^0, k_x, k_y, k_{xy}$ bukan merupakan fungsi z tetapi merupakan fungsi bidang tengah maka persamaan diatas menjadi :

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix}$$

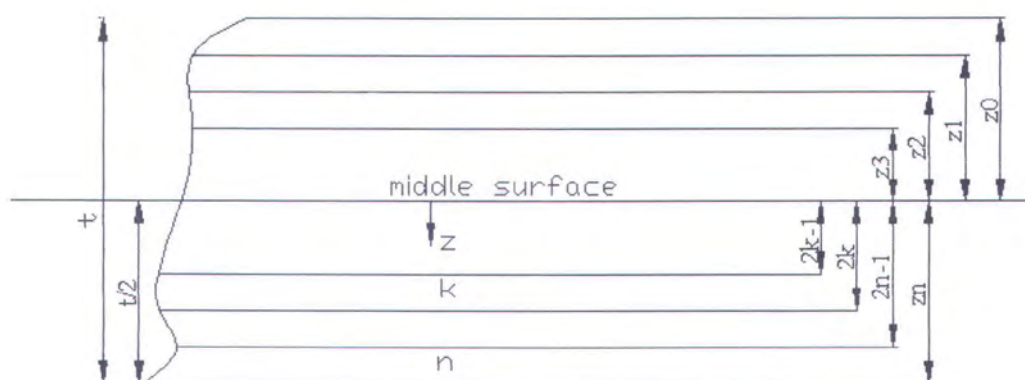
Dimana :

A_{ij} = matrik kekakuan panjang

$$= \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k \cdot (z_k - z_{k-1})$$

$$= \int_{-t/2}^{t/2} (\bar{Q}_{ij})_k \cdot dz \quad (2.8-13)$$

z = besarnya jarak antara sumbu tengah laminasi dengan permukaan ke- k .



Gambar 2.10. Jarak z dari bidang tengah.



2.8.7. Kelengkungan Akibat Beban bending.

Pembebanan suatu material selama pengujian akan menimbulkan gaya dan momen. Gaya dari luar tersebut adalah gaya bending atau gaya tarik yang masing-masing dibebankan pada specimen sampai kondisi patah pada benda uji. Gaya luar tersebut dapat dituliskan sebagai berikut :

$$N_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x \cdot dz \quad (2.8-18)$$

Momen yang timbul oleh gaya tersebut adalah beban dari luar untuk bending (M_x) terjadi sebagai akibat adanya curvature terhadap sumbu utama pembebanan (sumbu X). kelengkungan yang terjadi sebagai pembebanan bending diasumsikan hanya terjadi terhadap sumbu x karena span searah sumbu y. jadi juga diasumsikan bahwa tidak terjadi lengkungan terhadap sumbu y maupun bidang 1 kearah 2. Besarnya adalah :

$$M_x = \frac{Ef_x \cdot I}{(\rho_x \cdot b)} \quad (2.8-19)$$

dimana : $Ef_x = \frac{12}{t^3} \cdot D_{11}$

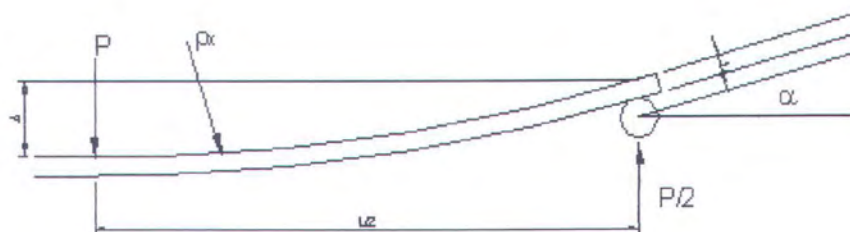
$$I = \frac{b \cdot t^3}{12}$$

Ef_x = Modulus flexture sepanjang sumbu y.

I = momen inersia terhadap sumbu tengah.

b = panjang span.

t = tebal specimen.



Gambar 2.11. Kelengkungan akibat beban bending.

Besarnya kelengkungan atau defleksi akibat pembebanan bending berdasarkan perhitungan adalah :

$$\begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{D}_{11} & \bar{D}_{12} & \bar{D}_{16} \\ \bar{D}_{12} & \bar{D}_{22} & \bar{D}_{26} \\ \bar{D}_{16} & \bar{D}_{26} & \bar{D}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{B}_{11} & \bar{B}_{12} & \bar{B}_{16} \\ \bar{B}_{12} & \bar{B}_{22} & \bar{B}_{26} \\ \bar{B}_{16} & \bar{B}_{26} & \bar{B}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.8-20)$$

yang dalam ini : $k_x = 1/\rho_x$

$$k_y = 1/\rho_y$$

$$k_{xy} = 1/\rho_{xy}$$

dimana M adalah momen akibat beban bending.

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_x^B \\ M_y^B \\ M_{xy}^B \end{bmatrix}$$

besarnya matrik invers B_{ij} tidak dapat diketahui atau tidak teridentifikasi karena tidak mempunyai determinan, jadi perhitungan dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut :

$$[M] = [D][k] + [B][\varepsilon] \quad (2.8-21)$$



dikerjakan terlebih dahulu perhitungan matrik Bij, M

$$[M] = [B.\varepsilon] + [D][k]$$

$$[M] - [B.\varepsilon] = [D][k]$$

Dimana : $[B.\varepsilon] = [B]x[\varepsilon]$

Selanjutnya :

$$[M] - [B.\varepsilon] = [D]x[k]$$

$$[k] = [D]^{-1}x[M - B.\varepsilon]$$



BAB III

PELAKSANAAN PENGUJIAN

3.1. Material Pengujian

Bahan yang digunakan dalam pengujian ini adalah bahan yang berasal dari kayu. Hal ini dimaksudkan hasil dari pengujian ini untuk menguji dan mengetahui sifat-sifat kayu laminasi dalam menerima beban bending. Secara khusus pengujian ini ditujukan pada kayu tunggal biasa dan kayu laminasi. Langkah pembuatan sampel disesuaikan dengan kayu yang digunakan di lapangan, sehingga dalam pengujian nanti tidak dipengaruhi oleh faktor-faktor tersebut.

Kayu yang digunakan berupa papan-papan yang sering digunakan dalam konstruksi perkapalan. Dalam pemilihan benda uji ini, dipilih kayu-kayu yang biasa digunakan dalam suatu konstruksi bangunan khususnya bangunan kapal kayu. Kayu-kayu tersebut antara lain bengkirai, ulin, kamper, jati, dan lain-lain. Untuk pembuatan benda uji ini dipilih kayu bengkireh. Alasan pemilihan kayu ini adalah jenis kayu ini sering digunakan dalam konstruksi khususnya pada konstruksi kapal kayu. Selain itu jenis kayu bengkireh banyak didapat di pasaran dan harganya juga relatif lebih terjangkau.

Sifat-sifat dari kayu bengkireh ini dapat dilihat pada table dibawah ini:

Jenis kayu	Kelas Awet	Kelas kuat	Susut	Berat jenis kering udara (gr/cm^3)		
				Min	Max	Rata-rata
bengkireh	I-II	I-II	B*	0,60	1,16	0,91



Klasifikasi dari sifat-sifat kayu menurut K.H Felix dalam buku Konstruksi Kayu adalah sebagai berikut :

Kelas	Berat jenis udara kering	Kukuh lentur mutlak	Kukuh tekanan mutlak	Keawetan berhubungan dengan kelembaban
I	$\geq 0,90$	≥ 1100	≥ 650	8 Th
II	$0,90 - 0,60$	$1100 - 725$	$650 - 425$	5 Th

Klasifikasi kelas susut * :

- a : sedikit
- b : sedang
- c : besar

3.2. Pembuatan Spesimen Uji

Dalam pengujian untuk tugas akhir ini, uji tarik hanya dikhususkan pada material dasar berupa resin. Material tersebut sebagai salah satu penyusun konstruksi kayu laminasi. Pengujian ini dengan maksud untuk mendapatkan *Mechanical Properties* dari material dasar berupa resin yang hasilnya akan dikorelasikan dengan data *Mechanical Properties* dari literature yang ada. *Mechanical Properties* ini hanya meliputi modulus elastisitas bahan yang terdiri dari modulus elastisitas tarik dan modulus elastisitas geser.

Pada pengujian ini dibuat 3 buah benda uji dengan alasan untuk memenuhi standard minimum untuk rata-rata sebuah pengujian. Secara teoritis semakin



banyak benda uji maka hasil pengujian yang didapatkan semakin baik. Tetapi karena faktor biaya dan waktu maka tidak memungkinkan untuk membuat benda uji yang banyak.

Ukuran lebar dan tebal disesuaikan dengan bentuk papan yang biasa digunakan dalam konstruksi dan panjangnya disesuaikan dengan kebutuhan dan peralatan pengujian. Alasan demikianlah yang menyebabkan kita mengadakan pengujian yang sesederhana mungkin.

3.2.1. Spesimen Uji Tarik Resin

Spesimen uji tarik ini dibuat menggunakan standard ASTM D638-84 1986 (*Standard test method for tensile properties of plastic*) untuk pengujian perekat (*glue test*) dimana diambil diameter resin 22 mm Panjang 200 mm.

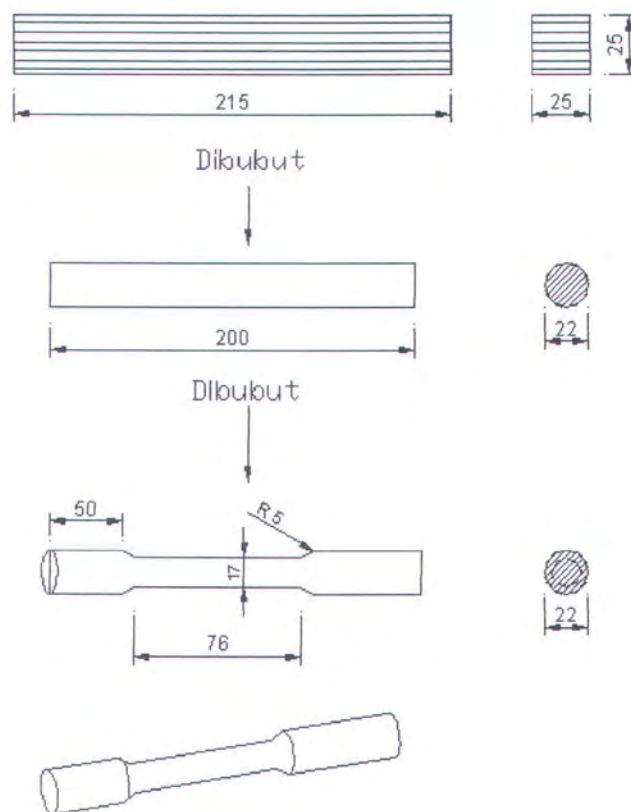
Langkah-langkah pembuatan benda uji resin untuk modulus elastisitas tarik sebagai berikut :

1. Membuat kotak persegi panjang dari bahan seng dengan ukuran panjang 215 mm, lebar 25 mm, dan tinggi 25 mm.
2. Kotak dibersihkan dari kotoran agar spesimen tidak mengalami cacat akibat adanya kotoran yang tertinggal.
3. Mempersiapkan perekat yang akan dicetak berupa epoxy resin yang terdiri dari dua jenis campuran yang berupa cairan perekat (*adhesive resin*) dan cairan pengeras (*hardener*) yang kedua-duanya dicampurkan secara merata dengan perbandingan satu banding satu.
4. Menuangkan perekat yang sudah tercampur kedalam kotak sampai memenuhi ketebalan yang dikehendaki.



5. Melakukan pengeringan dengan menggunakan oven atau pengeringan dengan pemanasan matahari pada suhu luar dengan waktu yang relatif lebih lama.
6. Setelah perekat kering dan mengeras, dilepaskan atau dikeluarkan dari kotak.
7. Batangan resin/perekat yang telah kering dan mengeras kemudian dibubut dengan mesin bubut sampai mencapai ukuran diameter 22 mm.
8. Setelah resin menjadi berupa silinder, kemudian dilakukan pembubutan kembali pada bagian tengah dengan ditiruskan melengkung dengan radius 5 mm sehingga didapat bentuk standart pengujian tarik (*gambar 3.1*).

Bahan perekat atau resin yang dipakai adalah epoxy resin.



Gambar 3.1. Spesimen uji tarik resin



3.2.2. Spesimen Uji Bending Konstruksi Kayu Laminasi.

Pada pengujian ini terdiri dari tiga jenis spesimen pengujian konstruksi kayu laminasi. Konstruksi Kayu laminasi ini berbeda dengan konstruksi kayu tunggal biasa karena penggunaan perekat dan lapisan-lapisan papan. Spesimen yang digunakan disesuaikan dengan kondisi lapangan yaitu lebar 200 mm, tebal 30 mm dan panjang spesimen disesuaikan ukuran mesin penguji (bending) yang digunakan yaitu diambil 600 mm.

Adapun jenis spesimen pertama mewakili konstruksi kayu tunggal biasa yang berupa papan. Untuk jenis spesimen kedua dan ketiga mewakili jenis konstruksi kayu laminasi. Spesimen jenis kedua ini menggunakan dua lapis papan sebagai penyusun konstruksi kayu laminasi sedangkan pada spesimen jenis ketiga menggunakan tiga lapis papan sebagai penyusun konstruksi kayu laminasi.

Langkah-langkah pembuatan spesimen uji bending konstruksi kayu laminasi jenis pertama adalah sebagai berikut :

1. Papan kayu yang akan digunakan sebagai bahan spesimen percobaan dibersihkan dan dihaluskan permukaannya dengan mesin penghalus kayu.
2. Papan yang sudah halus semua permukaannya diukur ketebalan dan lebarnya sesuai ukuran yang dibutuhkan yaitu tebal 30 mm dan lebar 200 mm.
3. Apabila dalam pengukuran ada kelebihan ukuran maka dilakukan penghalusan ulang untuk mengurangi ketebalan spesimen.
4. Papan kayu yang sudah bersih dan halus dipotong-potong dengan ukuran panjang 600 mm dan lebar 200 mm (*gambar 3.2a*).



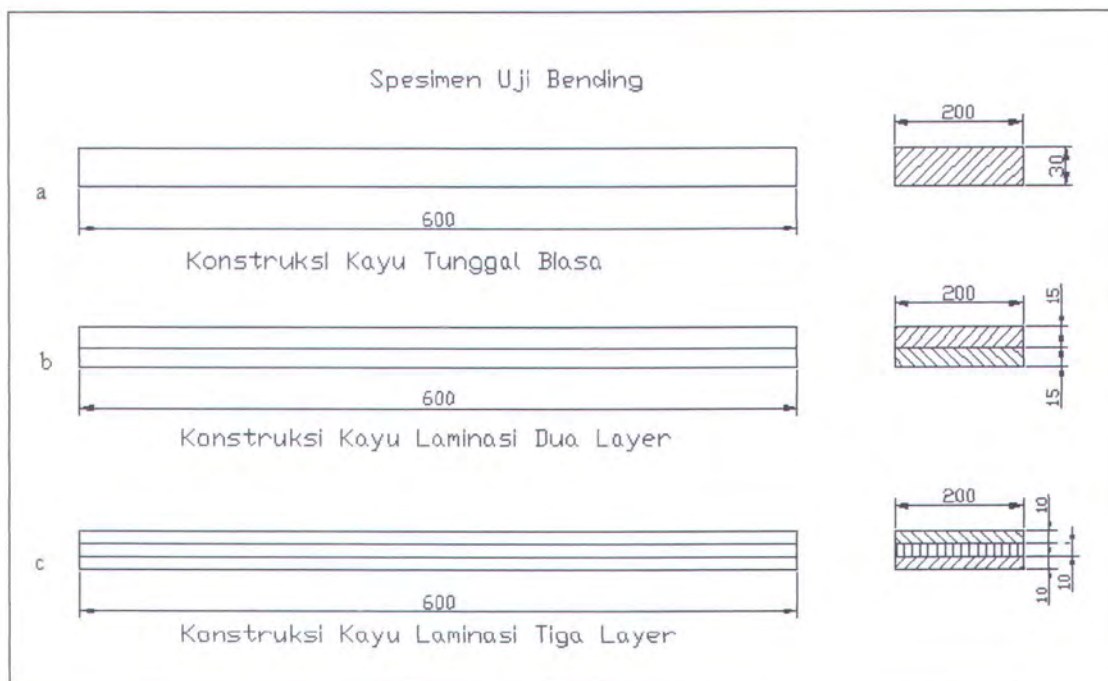
Langkah-langkah pembuatan spesimen uji bending konstruksi kayu laminasi jenis kedua adalah sebagai berikut :

1. Papan kayu yang akan digunakan sebagai bahan specimen ini berupa papan dengan ketebalan 20 mm sehingga papan perlu diskrap untuk mencapai ketebalan yang sesuai.
2. Papan kayu hasil penyekrapan dibersihkan dan dihaluskan permukaannya dengan mesin penghalus kayu.
3. Pada spesimen kayu laminasi jenis kedua ini menggunakan dua lapisan papan dengan ketebalan masing-masing 15 mm untuk mendapatkan spesimen kayu laminasi dengan ketebalan 30 mm.
4. Papan yang sudah halus dan telah memiliki ukuran yang sesuai dipotong dengan panjang 600 mm.
5. Mempersiapkan perekat dengan mencampurkan cairan perekat (*adhesive resin*) dengan cairan pengeras (*hardener*) dari epoxy resin secara merata dengan perbandingan satu banding satu.
6. Melumurkan perekat pada salah satu permukaan untuk kedua papan secara merata.
7. Merekatkan kedua papan pada permukaan yang telah dilumuri oleh perekat kemudian ditekan dengan alat penekan dapat berupa hydrolis atau penjepit (*rocker-head clamp*) sampai mengering dan mengeras (*gambar 3.2b*).



Langkah-langkah pembuatan spesimen uji bending konstruksi kayu laminasi jenis ketiga adalah sebagai berikut :

1. Papan kayu yang akan digunakan sebagai bahan spesimen ini berupa papan dengan ketebalan 20 mm sehingga papan perlu diskrap untuk mencapai ketebalan yang sesuai.
2. Papan kayu hasil penyekrapan dibersihkan dan dihaluskan permukaannya dengan mesin penghalus kayu.
3. Pada spesimen kayu laminasi jenis ketiga ini menggunakan tiga lapisan papan dengan ketebalan masing-masing 10 mm untuk mendapatkan spesimen kayu laminasi dengan ketebalan 30 mm.
4. Papan yang sudah halus dan telah memiliki ukuran yang sesuai dipotong dengan panjang 600 mm.
5. Mempersiapkan perekat dengan mencampurkan cairan perekat (*adhesive resin*) dengan cairan pengeras (*hardener*) dari epoxy resin secara merata dengan perbandingan satu banding satu.
6. Melumurkan perekat pada salah satu permukaan untuk kedua papan secara merata dan kedua permukaan untuk satu papan.
7. Merekatkan ketiga papan pada permukaan yang telah yang telah dilumuri oleh perekat dimana untuk lapisan kedua dari papan yang dilumuri perekat pada kedua permukaannya kemudian ditekan dengan alat penekan dapat berupa hydrolis atau penjepit (*rocker-head clamp*) sampai mengering dan mengeras (*gambar 3.2c*).



Gambar 3.2. Spesimen uji bending kayu laminasi.

3.3 PENENTUAN BEBAN

Beban yang diberikan dalam pengujian ini ada dua jenis beban. Untuk jenis beban pertama berupa pengujian tarik untuk mengetahui besar Modulus Elastisitas resin menggunakan beban terusan (Continuous). Pembebanan dimulai dari beban nol yang kemudian naik sedikit demi sedikit secara langsung sampai material patah atau rusak. Beban jenis kedua untuk pengujian bending adalah jenis beban bertingkat (incremental). Pada waktu pembebanan awal, beban diberikan sebesar 1000 N. Hal ini dimaksudkan agar deformasi yang terjadi pada benda uji dapat terlihat. Jika benda uji diberikan beban terlalu kecil maka deformasi yang terjadi akan kecil sekali sehingga akan sulit dalam pengukuran. Setelah diberikan beban yang pertama kemudian beban itu dilepaskan. Setelah itu beban ditambah lagi menjadi lebih besar dengan kelipatan 1000 N dan seterusnya sampai benda uji mengalami kerusakan.



3.4 PENGUJIAN

Dalam tugas akhir ini pengujian yang akan dilakukan adalah pengujian tekuk (*Static Bending*) dan pengujian tarik (*Tension Test*). Alasan menggunakan *static bending* ini karena dalam tugas akhir ini ingin mengetahui sifat material kayu laminasi dalam menerima beban bending. Sedangkan pengujian tarik untuk mengetahui nilai dari modulus elastisitas kayu maupun resin/perekat yang digunakan. Sebelum dilakukan pengujian dilakukan persiapan-persiapan, yaitu persiapan alat uji serta benda uji. Untuk uji bending ini peralatan yang diperlukan adalah :

- Mesin Bending
- *Dial Gauge*
- Jangka Sorong

Untuk uji tarik ini peralatan yang diperlukan adalah :

- Mesin Uji Tarik
- Kertas grafik.
- Penindai/tinta grafik

Setelah semua persiapan sudah siap maka pengujian dapat segera dilakukan. Pengujian dilakukan terhadap semua spesimen dan semua jenis kayu.

Adapun untuk benda uji yang akan diuji ada 2 macam, yaitu :

- **Resin**, yang terdiri dari :
 1. Resin murni untuk elastisitas tarik
 2. Resin dengan papan untuk elastisitas geser

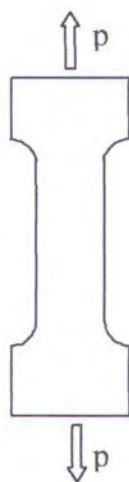


- **Papan**, yang terdiri dari:
 1. Papan tunggal biasa.
 2. Papan kayu laminasi dengan dua layer.
 3. Papan kayu laminasi dengan tiga layer.

3.4.1 Tahap Pengujian Tarik

Pada pengujian ini, ada dua specimen yaitu perekat (epoxy resin) murni dan Resin untuk geser. Pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan modulus elastisitas resin. Pemberian beban pada *specimen* ini dilakukan dengan beban yang terus meningkat sampai specimen patah. Sehingga antara beban dan regangan bisa dibuat sebuah grafik, dimana sumbu x adalah regangan (*strain, ϵ*) dan sumbu y adalah beban.

Grafik regangan ini dapat diukur langsung oleh alat ukur uji tarik dan digambar dalam kertas grafik. Dari grafik ini akan didapat modulus elastisitas tarik dari kayu atau resin dengan melihat sudut kemiringan (*slope*) grafik antara regangan dan beban.



Gambar 3.3. Pengujian tarik



Setelah semua persiapan selesai maka pengujian siap dilaksanakan.

Adapun kegiatan yang dilakukan adalah sebagai berikut :

- 1) Pemeriksaan material meliputi dimensi dan penomoran *specimen*.
- 2) Memeriksa mesin uji tarik apakah sudah siap untuk digunakan.
- 3) Menghidupkan mesin uji tarik.
- 4) Melakukan kalibrasi mesin uji tarik untuk beban dan regangan.
- 5) Memasang dengan benar *specimen* pada mesin uji tarik.
- 6) Memasang kertas garfik dan alat pemindai pada alat uji tarik.
- 7) Mengatur nilai beban mulai dari beban nol kemudian naik secara beraturan sampai material patah.
- 8) Selama proses pembebanan besarnya regangan dan beban yang terjadi akan tercatat dalam kertas dalam bentuk grafik.
- 9) Pembebanan dilakukan sampai material uji patah.
- 10) Melepas kertas grafik untuk mencatat hasil dari pengujian tarik ini.
- 11) Pengujian ini berlaku untuk semua *specimen* uji tarik resin murni.

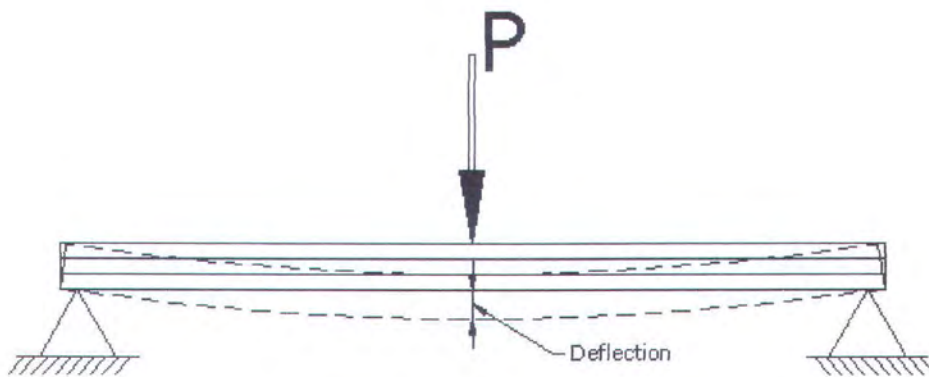
Secara teoritis grafik dari pengujian diatas berupa garfik antara beban dan regangan (*stress-strain*) untuk material resin yang memiliki sifat getas adalah seperti grafik 3.1.

3.4.2 Tahap Pengujian Bending

Pemberian beban pada *specimen* ini dilakukan dengan beban bertingkat dan berulang sampai *specimen* patah. Sehingga antara beban dan *deflection* bisa dibuat sebuah grafik, dimana sumbu x adalah lenturan (*deflection*) dan sumbu y adalah beban.



Pada pengujian bending ini akan didapatkan data mengenai lenturan (*deflection*) yang terjadi pada benda uji. Adapun jenis *deflection* yang terjadi ada 2 macam yaitu *deflection* beban dan *deflection* sisa. *Deflection* beban diukur pada saat *specimen* diberi beban kemudian diukur lenturannya. Sedangkan *deflection* sisa diukur pada saat beban dilepaskan kemudian diukur *deflection* yang terjadi. Pengujian bending pada material kayu laminasi dapat dilihat seperti pada gambar dibawah ini (*gambar 3.4*).



Gambar 3.4 Pengujian Bending.

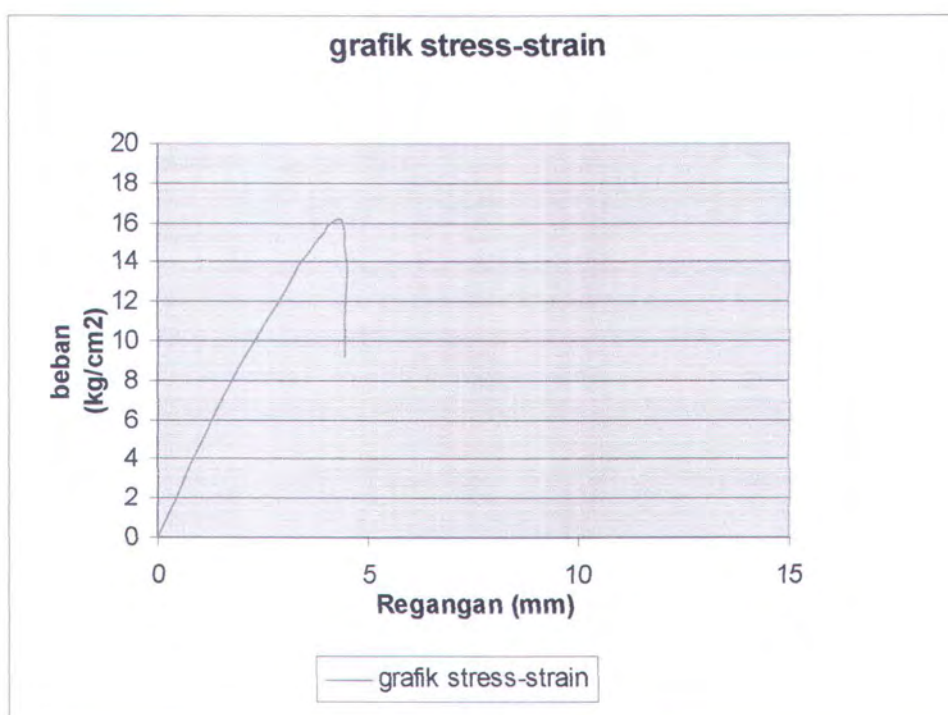
Setelah semua persiapan selesai maka pengujian siap dilaksanakan. Adapun kegiatan yang dilakukan adalah sebagai berikut :

- 1) Pemeriksaan material meliputi dimensi dan penomoran *specimen*.
- 2) Memeriksa mesin uji bending apakah sudah siap untuk digunakan.
- 3) Menghidupkan mesin uji bending.
- 4) Melakukan kalibrasi mesin untuk verifikasi hasil pengujian.
- 5) Memasang dengan benar *specimen* pada mesin uji bending.
- 6) Mengatur nilai beban sesuai dengan rencana dan nilai beban dapat dilihat pada indicator.

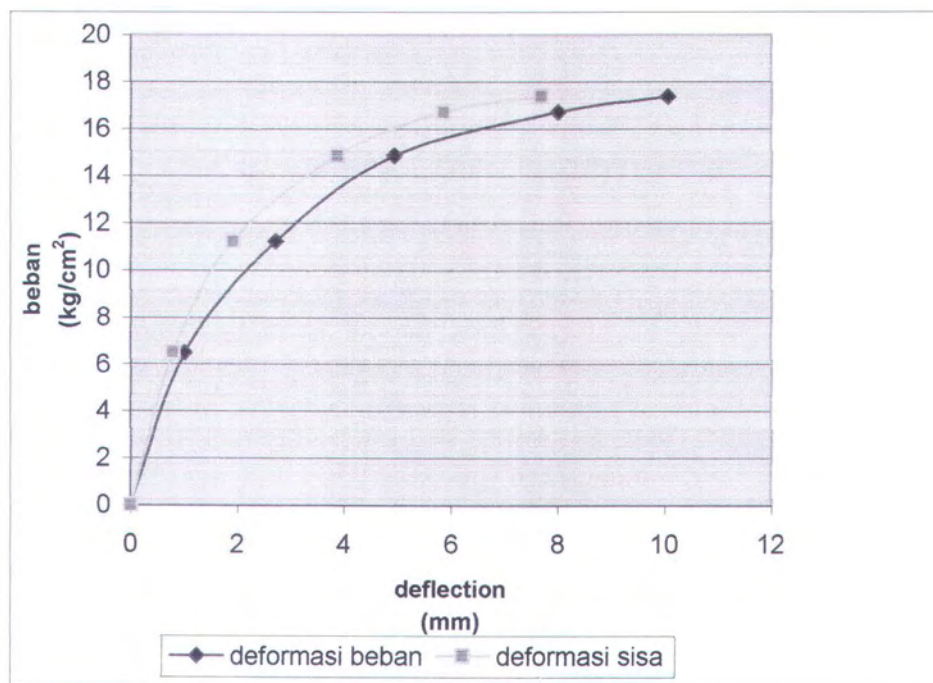


- 7) Selama proses pembebanan diukur besarnya *deflection* yang terjadi dengan menggunakan *dial gauge*.
- 8) Beban dilepaskan kemudian diukur *deflection* sisa yang terjadi pada *specimen*.
- 9) Beban dinaikkan menjadi lebih besar sesuai dengan rencana dan selama proses pembebanan diukur *deflection* yang terjadi.
- 10) Beban dilepaskan dan diukur *deflection* sisa pada *specimen*.
- 11) Hal diatas diulang – ulang sampai *specimen* mengalami kerusakan.
- 12) Pengujian ini berlaku untuk semua *specimen* dengan jenis konstruksi laminasi yang berbeda.

Secara teoritis grafik dari pengujian diatas yaitu *deflection* beban dan *deflection* sisa adalah seperti grafik 3.2.



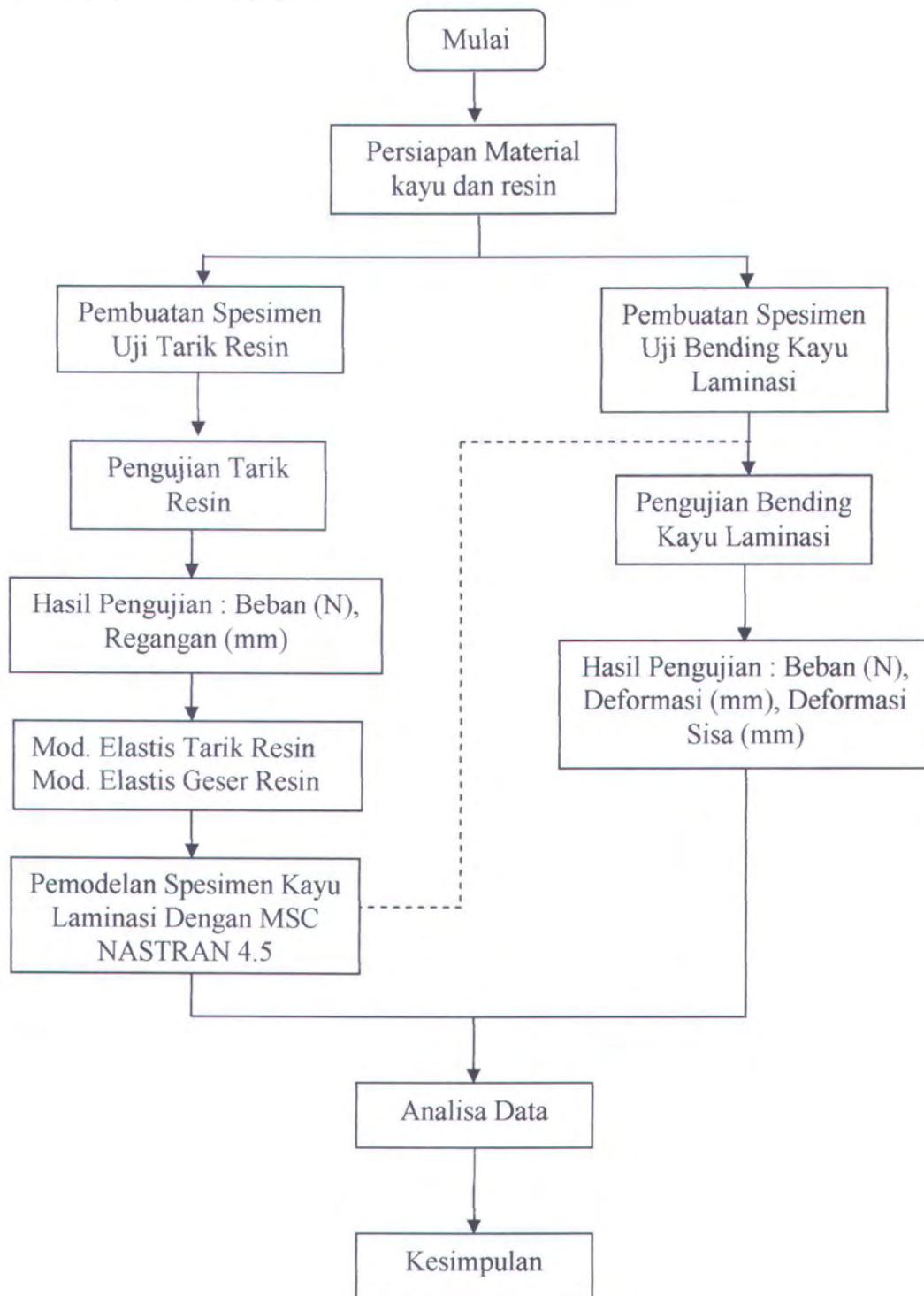
Grafik 3.1 Grafik Stress-Strain.



Grafik 3.2 Grafik *Deflection* dan Pembebanan



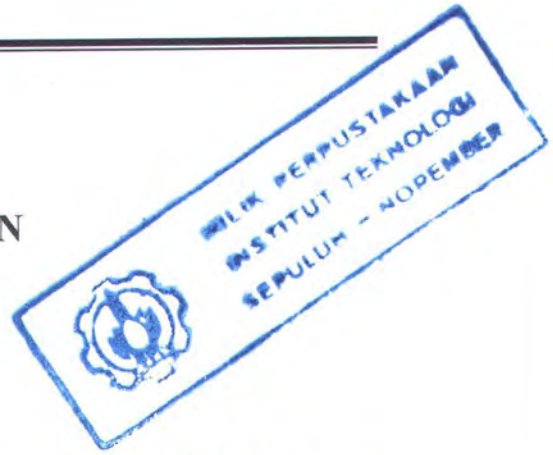
3.5 Flowchart Pengujian





BAB IV

HASIL PENGUJIAN



4.1. Tinjauan Statistik Hasil Pengujian

Grafik yang dihasilkan dari data hasil pengujian tidak semuanya bentuknya sesuai yang diinginkan. Hal ini bisa terjadi dikarenakan adanya kekurangtelitian dan kesulitan dalam pembacaan pada alat ukur (*dial gauge*) dan layar display hasil pembacaan *Load Cell* pada saat pengujian. Untuk mengatasi hal ini maka grafik pengujian diregresi polinomial.

Dengan adanya regresi polinomial maka grafik yang dihasilkan menjadi lebih baik. Dari grafik regresi ini juga dihitung besarnya harga r yaitu koefisien korelasi (*correlation coefficient*), yang menggambarkan sampai seberapa jauh grafik regresi mampu menjelaskan data – data yang masih dalam keraguan atau kurang jelas. Koefisien korelasi harganya semakin mendekati 1 (satu) maka harga r tersebut semakin baik. Untuk menghitung besarnya harga r dari grafik regresi polinomial dilakukan perhitungan dengan cara seperti dijelaskan di bawah ini.

Persamaan regresi polinomial pangkat tertentu (m) yang digunakan dalam suatu grafik adalah seperti di bawah ini :

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m + e \quad (4.1)$$

Untuk mencari koefisien yang tidak diketahui dalam persamaan regresi polinomial dengan menggunakan persamaan di bawah ini :



$$a_0n + a_1\sum x_i + a_2\sum x_i^2 + \dots + a_m\sum x_i^m = \sum y_i \quad (4.2)$$

$$a_0\sum x_i + a_1\sum x_i^2 + a_2\sum x_i^3 + \dots + a_m\sum x_i^{m+1} = \sum x_i y_i \quad (4.3)$$

$$a_0\sum x_i^2 + a_1\sum x_i^3 + a_2\sum x_i^4 + \dots + a_m\sum x_i^{m+2} = \sum x_i^2 y_i \quad (4.4)$$

$$a_0\sum x_i^m + a_1\sum x_i^{m+1} + a_2\sum x_i^{m+2} + \dots + a_m\sum x_i^{2m} = \sum x_i^m y_i \quad (4.5)$$

harga – harga koefisien yang sudah diketahui dari persamaan 4.2 sampai persamaan 4.5 di atas kemudian dimasukkan pada persamaan 4.1 dan dibuatkan tabel seperti di bawah ini :

No	x_i	y_i	$(y_i - \bar{y})^2$	$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m + e$
Σ	Σ	Σ	S_t	S_r

Tabel 4.1. Tabel perhitungan regresi polynomial

$$r^2 = \frac{\sum t - \sum r}{\sum t}$$

dari nilai r^2 (*coefisient of determation*) kemudian dapat ditentukan harga dari r (*coeffisien corelation*). (S. C. Capra. “Metode Numerik”. 1988. Jakarta. Erlangga)

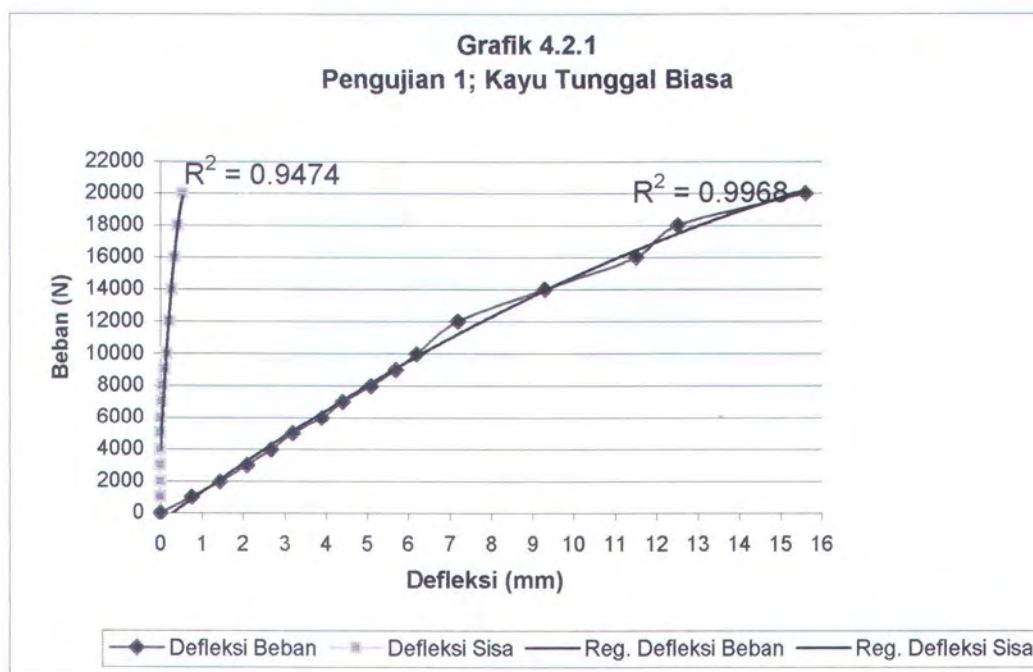


4.2. Pengujian Papan Kayu Biasa

Pengujian 1.

No	Beban (N)	Defleksi Beban (mm)	Defleksi Sisa (mm)
1	0	0	0
2	1000	0.76	0.00
3	2000	1.44	0.00
4	3000	2.10	0.00
5	4000	2.68	0.00
6	5000	3.20	0.00
7	6000	3.90	0.00
8	7000	4.40	0.02
9	8000	5.10	0.06
10	9000	5.70	0.10
11	10000	6.20	0.15
12	12000	7.20	0.20
13	14000	9.30	0.27
14	16000	11.50	0.34
15	18000	12.50	0.42
16	20000	15.60	0.54
17	22000	RUSAK	

Tabel 4.2.1 Pengujian I; Kayu Tunggal Biasa

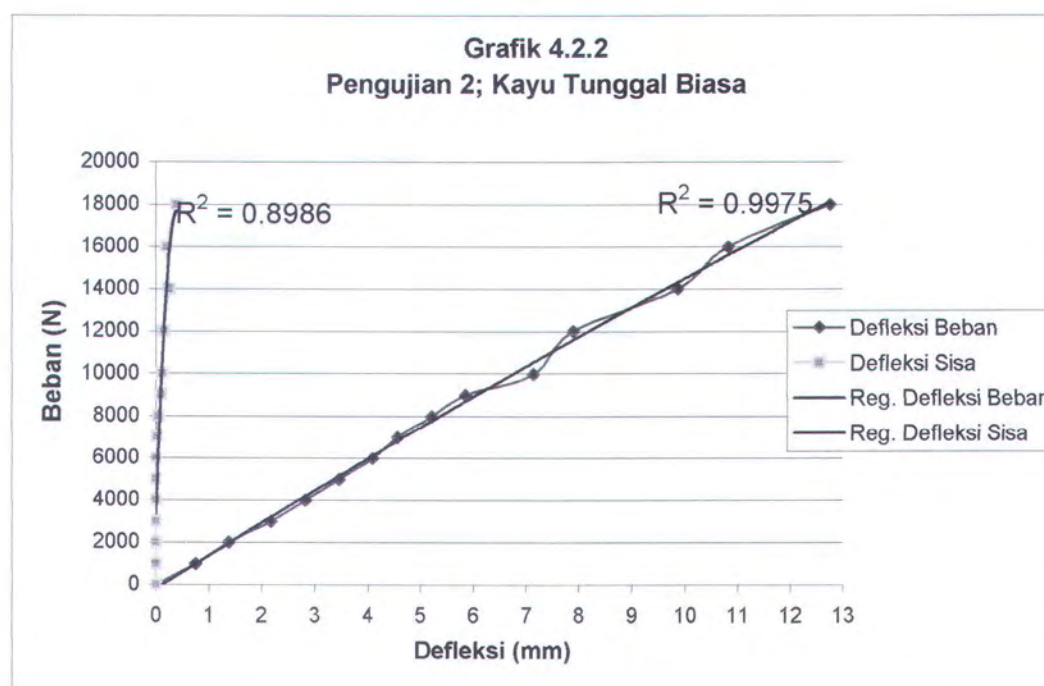




Pengujian 2.

No	Beban (N)	Defleksi Beban (mm)	Defleksi Sisa (mm)
1	0	0	0
2	1000	0.75	0.00
3	2000	1.37	0.00
4	3000	2.18	0.00
5	4000	2.82	0.00
6	5000	3.46	0.00
7	6000	4.10	0.00
8	7000	4.58	0.02
9	8000	5.22	0.05
10	9000	5.86	0.10
11	10000	7.14	0.12
12	12000	7.90	0.15
13	14000	9.86	0.25
14	16000	10.82	0.20
15	18000	12.75	0.39
16	20000	RUSAK	

Tabel 4.2.2 Pengujian 2; Kayu Tunggal Biasa

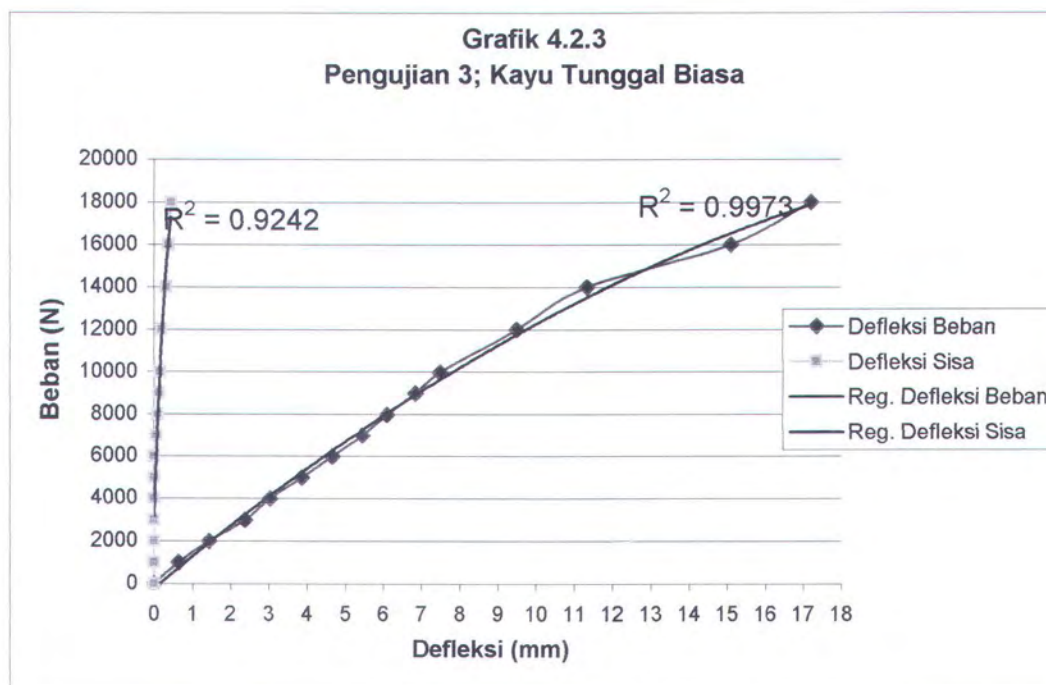




Pengujian 3.

No	Beban (N)	Defleksi Beban (mm)	Defleksi Sisa (mm)
1	0	0	0
2	1000	0.64	0.00
3	2000	1.44	0.00
4	3000	2.39	0.00
5	4000	3.05	0.00
6	5000	3.87	0.00
7	6000	4.67	0.00
8	7000	5.46	0.05
9	8000	6.12	0.10
10	9000	6.86	0.13
11	10000	7.50	0.15
12	12000	9.50	0.20
13	14000	11.34	0.32
14	16000	15.10	0.38
15	18000	17.20	0.44
16	20000	RUSAK	

Tabel 4.2.3 Pengujian 3; Kayu Tunggol Biasa

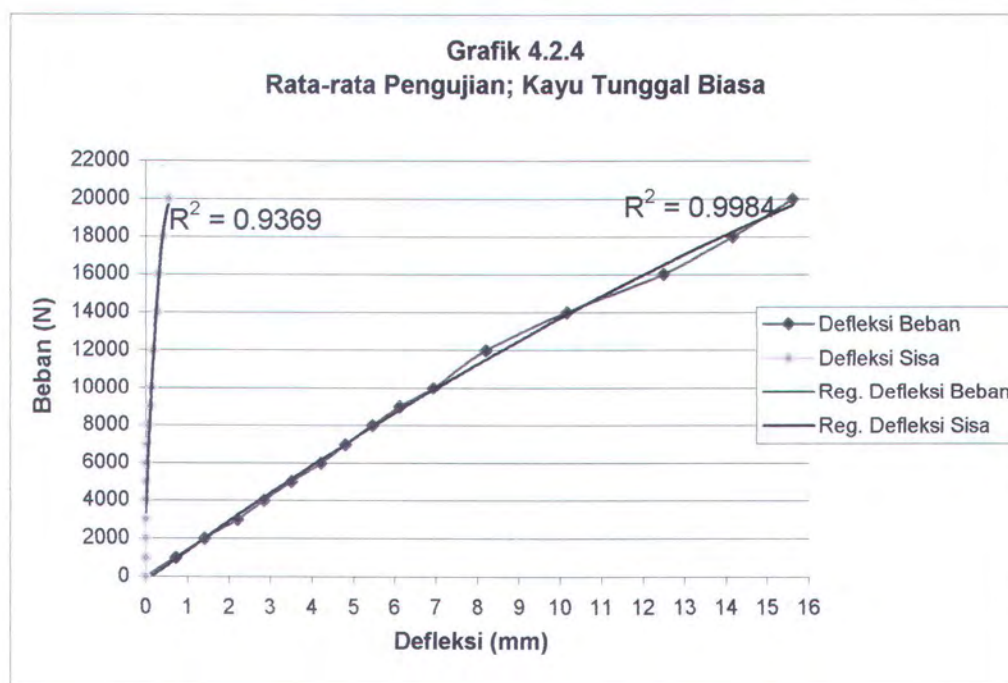




Hasil rata-rata dari tiga kali pengujian papan kayu tunggal biasa diperoleh nilai dan grafik sebagai berikut :

No	Beban (N)	Defleksi Beban (mm)	Defleksi Sisa (mm)
1	0	0	0
2	1000	0.72	0.00
3	2000	1.42	0.00
4	3000	2.22	0.00
5	4000	2.85	0.00
6	5000	3.51	0.00
7	6000	4.22	0.00
8	7000	4.81	0.03
9	8000	5.48	0.07
10	9000	6.14	0.11
11	10000	6.95	0.14
12	12000	8.20	0.18
13	14000	10.17	0.28
14	16000	12.47	0.31
15	18000	14.15	0.42
16	20000	15.60	0.54
17	22000	RUSAK	

Tabel 4.2.4 Hasil rata-rata; Kayu Tunggal Biasa



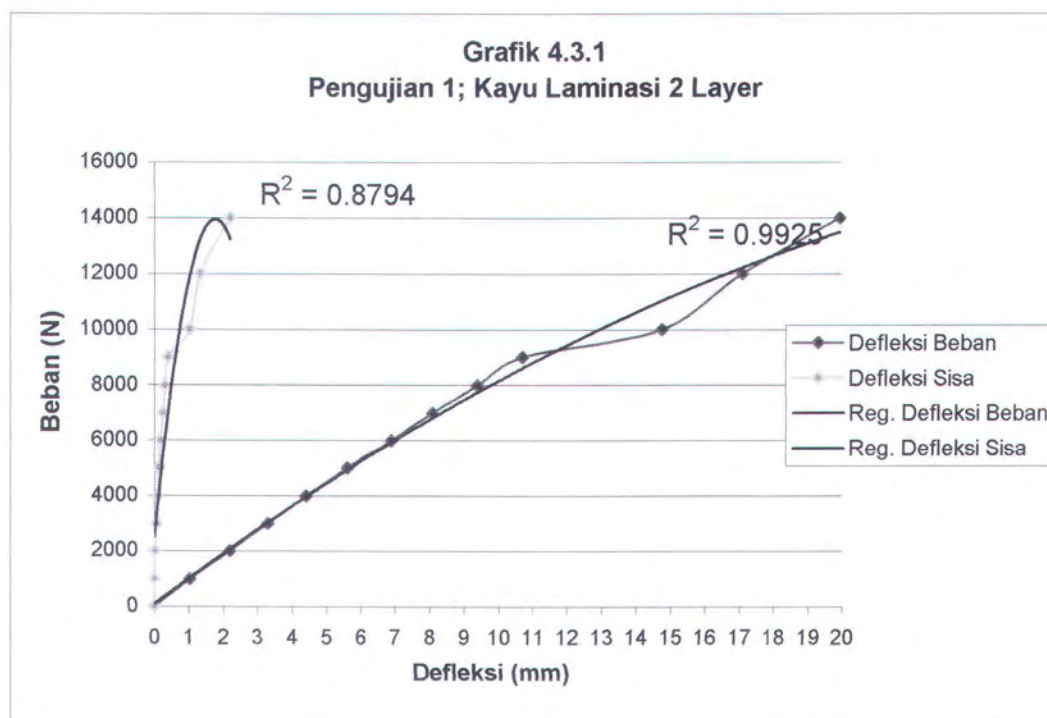


4.3. Pengujian Papan Kayu Laminasi Dua Layer

Pengujian 1 :

No	Beban (N)	Defleksi Beban (mm)	Defleksi Sisa (mm)
1	0	0.00	0.00
2	1000	1.03	0.00
3	2000	2.19	0.02
4	3000	3.30	0.06
5	4000	4.40	0.09
6	5000	5.60	0.13
7	6000	6.90	0.18
8	7000	8.10	0.24
9	8000	9.40	0.31
10	9000	10.70	0.41
11	10000	14.75	1.02
12	12000	17.10	1.34
13	14000	19.95	2.20
14	16000	RUSAK	

Tabel 4.3.1 Pengujian 1; kayu Laminasi Dua Layer

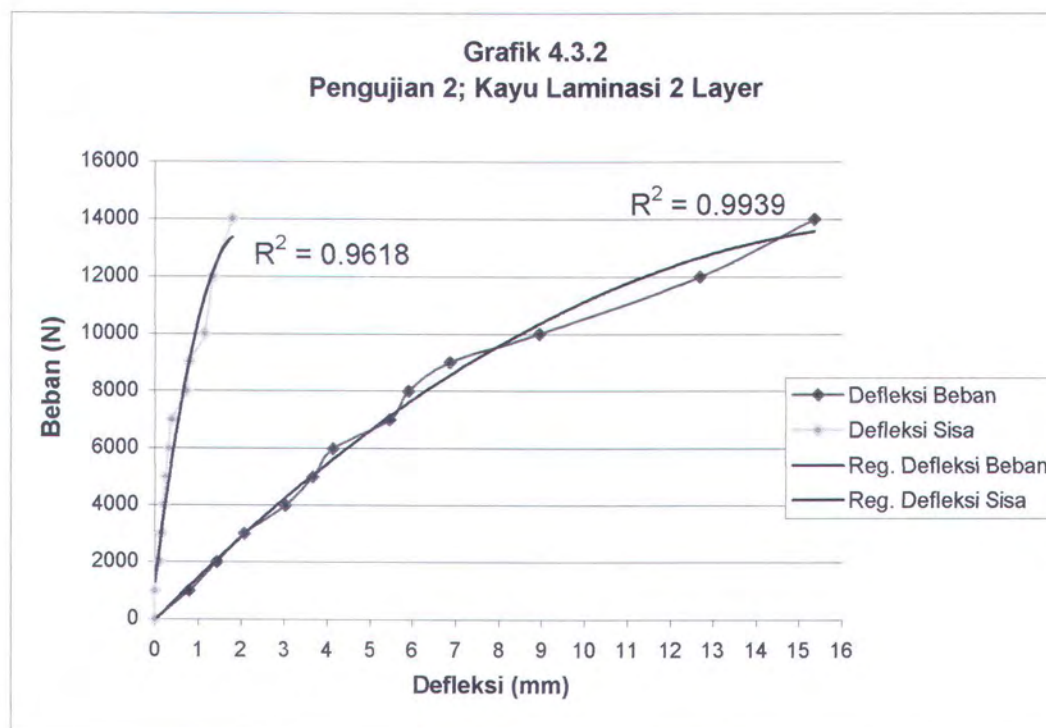




Pengujian 2 :

No	Beban (N)	Defleksi Beban (mm)	Defleksi Sisa (mm)
1	0	0	0
2	1000	0.80	0.00
3	2000	1.44	0.10
4	3000	2.08	0.15
5	4000	3.04	0.20
6	5000	3.68	0.25
7	6000	4.15	0.32
8	7000	5.48	0.40
9	8000	5.92	0.73
10	9000	6.88	0.80
11	10000	8.95	1.16
12	12000	12.68	1.35
13	14000	15.35	1.80
14	16000	RUSAK	

Tabel 4.3.2 Pengujian 2; kayu Laminasi Dua Layer

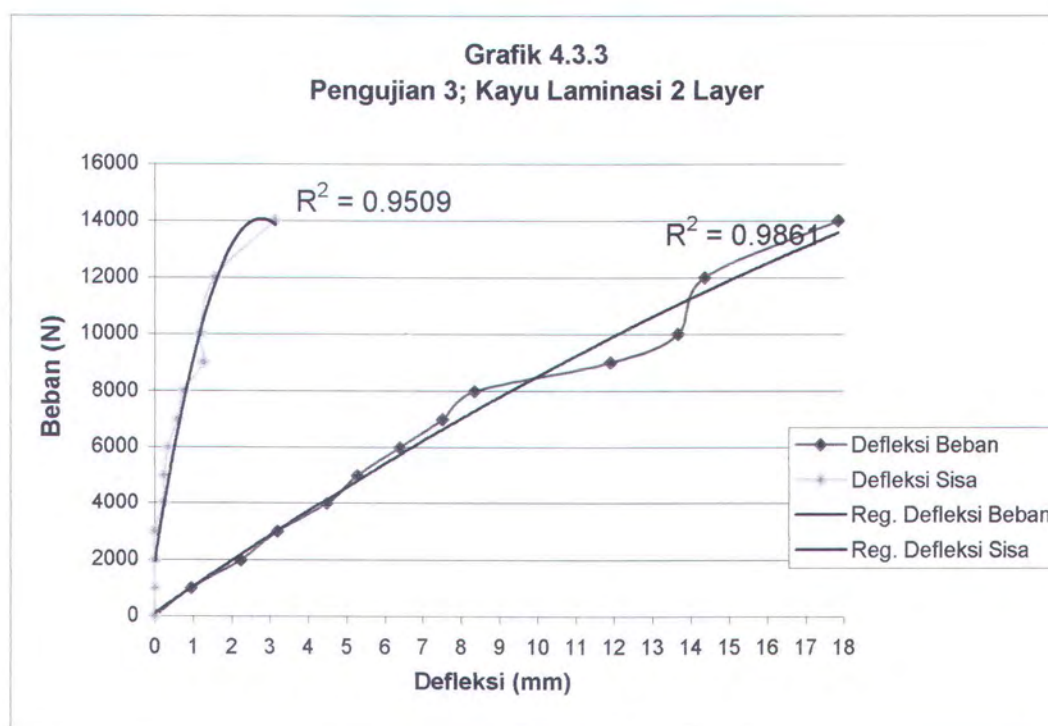




Pengujian 3 :

No	Beban (N)	Defleksi Beban (mm)	Defleksi Sisa (mm)
1	0	0	0
2	1000	0.95	0.00
3	2000	2.24	0.00
4	3000	3.20	0.00
5	4000	4.48	0.22
6	5000	5.28	0.25
7	6000	6.40	0.35
8	7000	7.53	0.60
9	8000	8.36	0.75
10	9000	11.90	1.27
11	10000	13.65	1.18
12	12000	14.35	1.56
13	14000	17.85	3.14
14	16000	RUSAK	

Tabel 4.3.3 Pengujian 3; kayu Laminasi Dua Layer

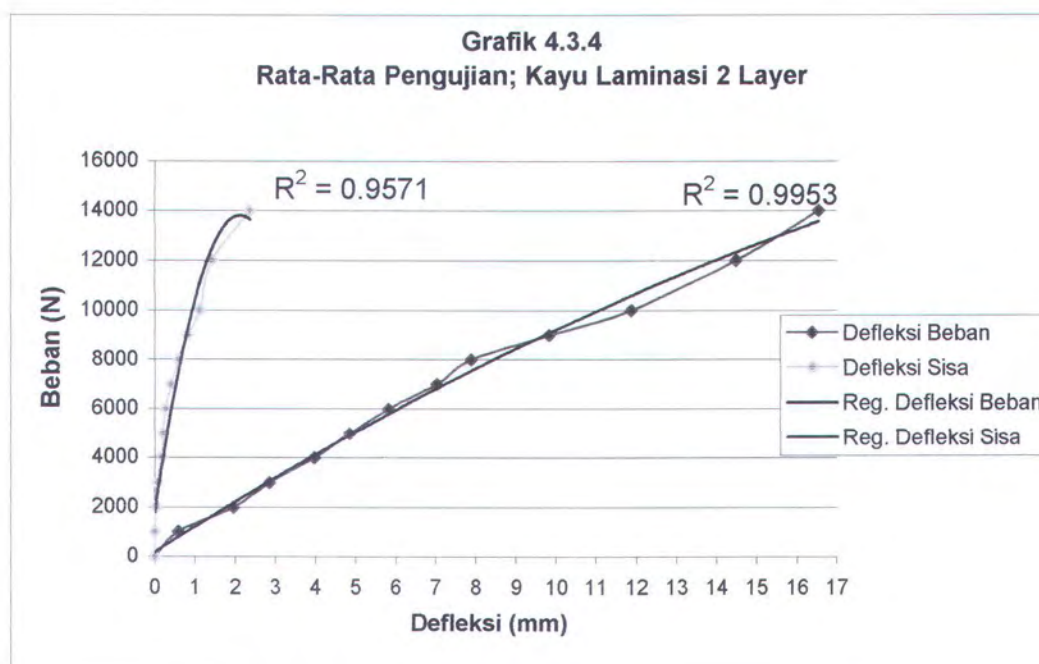




Hasil rata-rata dari tiga kali pengujian papan kayu laminasi dua layer diperoleh nilai dan grafik sebagai berikut :

No	Beban (N)	Defleksi Beban (mm)	Defleksi Sisa (mm)
1	0	0	0
2	1000	0.58	0.00
3	2000	1.96	0.04
4	3000	2.86	0.07
5	4000	3.97	0.17
6	5000	4.85	0.21
7	6000	5.82	0.28
8	7000	7.04	0.41
9	8000	7.89	0.60
10	9000	9.83	0.83
11	10000	11.87	1.12
12	12000	14.48	1.42
13	14000	16.55	2.38
14	16000	RUSAK	

Tabel 4.3.4 Hasil Rata-Rata; kayu Laminasi Dua Layer



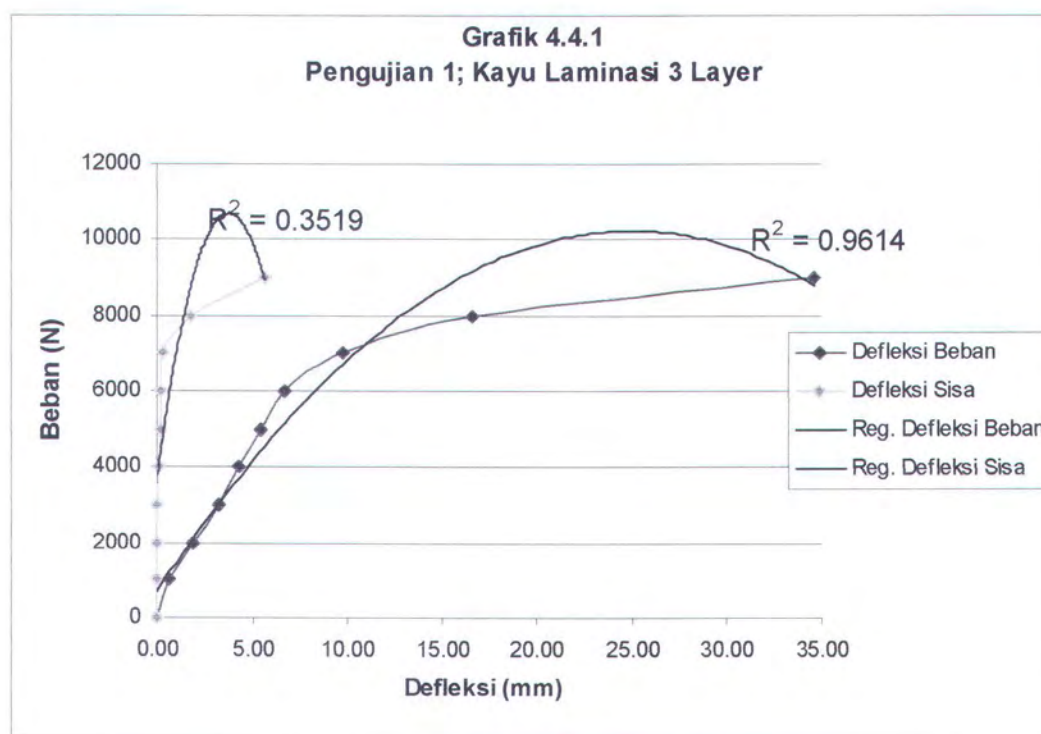


4.4. Pengujian Kayu Laminasi Tiga Layer

Pengujian 1:

No	Beban (N)	Defleksi Beban (mm)	Defleksi Sisa (mm)
1	0	0.00	0
2	1000	0.65	0.00
3	2000	1.93	0.00
4	3000	3.22	0.02
5	4000	4.32	0.10
6	5000	5.42	0.18
7	6000	6.72	0.25
8	7000	9.78	0.36
9	8000	16.56	1.82
10	9000	34.56	5.66
11	10000	RUSAK	

Tabel 4.4.1 Pengujian 1; kayu Laminasi Tiga Layer

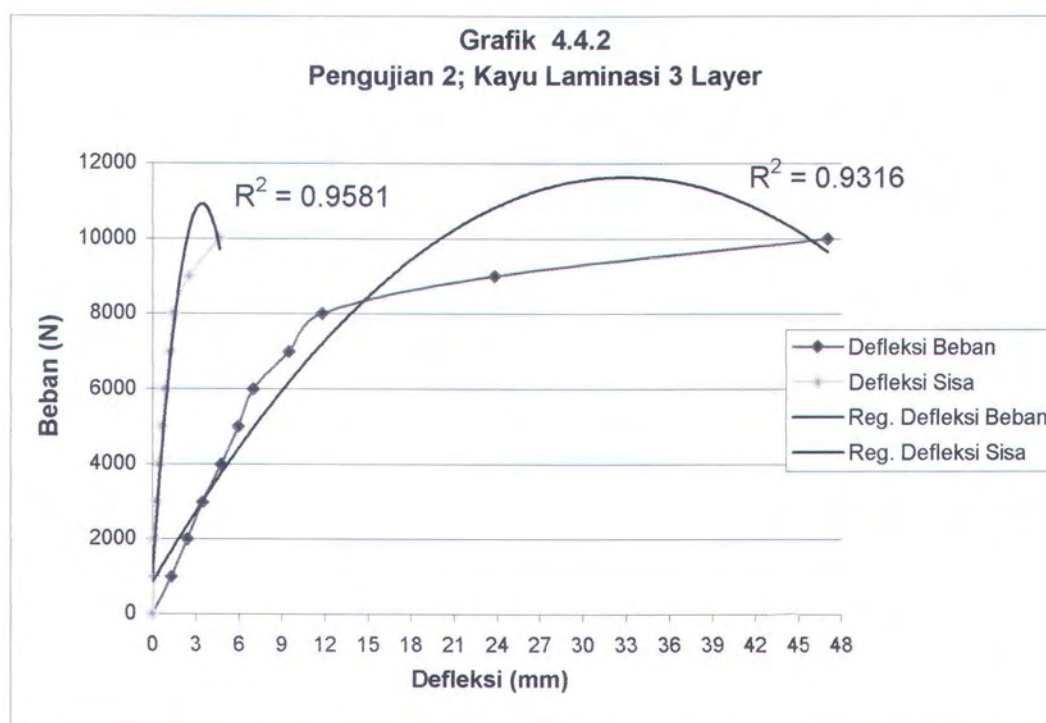




Pengujian 2 :

No	Beban (N)	Defleksi Beban (mm)	Defleksi Sisa (mm)
1	0	0	0
2	1000	1.29	0.10
3	2000	2.40	0.12
4	3000	3.50	0.25
5	4000	4.80	0.50
6	5000	5.98	0.65
7	6000	7.03	0.85
8	7000	9.50	1.23
9	8000	11.80	1.44
10	9000	23.84	2.55
11	10000	47.00	4.65
12	12000	RUSAK	

Tabel 4.4.2 Pengujian 2; kayu Laminasi Tiga Layer

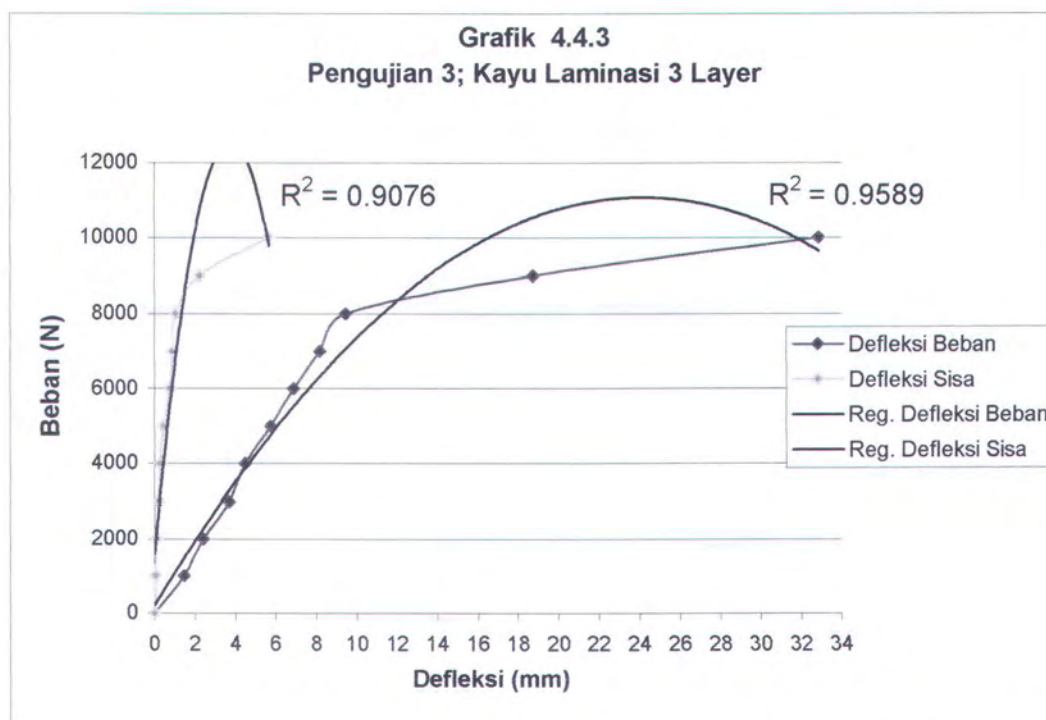




Pengujian 3 :

No	Beban (N)	Defleksi Beban (mm)	Defleksi Sisa (mm)
1	0	0	0
2	1000	1.44	0.05
3	2000	2.40	0.10
4	3000	3.68	0.20
5	4000	4.48	0.30
6	5000	5.76	0.45
7	6000	6.88	0.76
8	7000	8.18	0.90
9	8000	9.43	1.05
10	9000	18.72	2.25
11	10000	32.84	5.65
12	12000	RUSAK	

Tabel 4.4.3 Pengujian 1; kayu Laminasi Tiga Layer

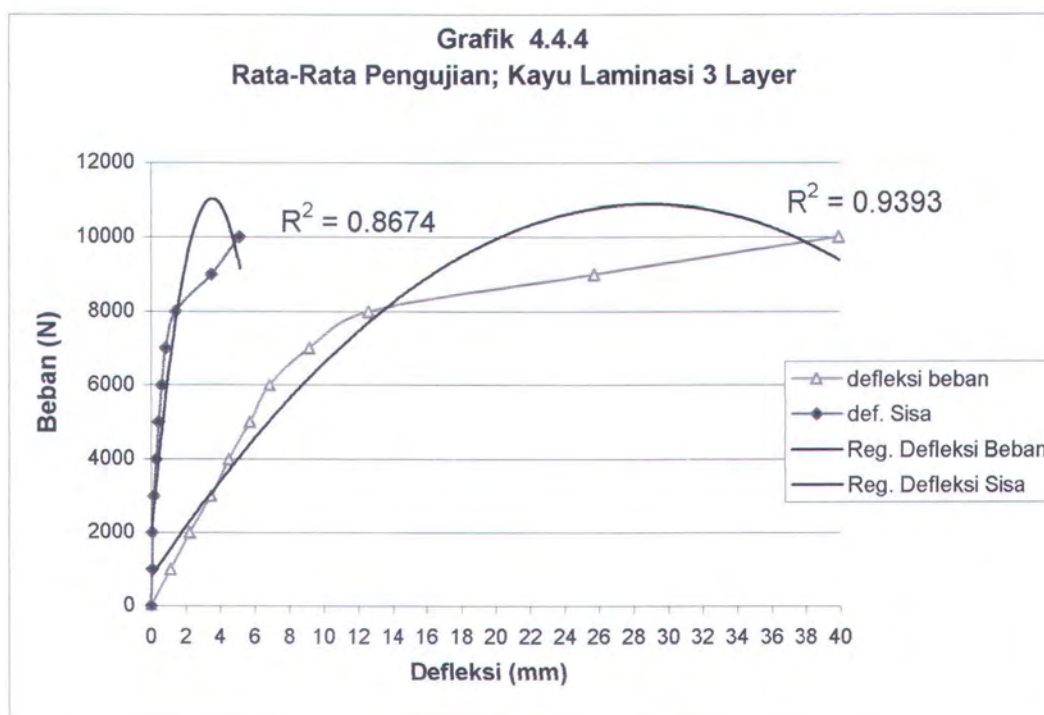




Hasil rata-rata dari tiga kali pengujian papan kayu laminasi Tiga Layer diperoleh nilai dan grafik sebagai berikut :

No	Beban (N)	Defleksi Beban (mm)	Defleksi Sisa (mm)
1	0	0	0
2	1000	1.13	0.05
3	2000	2.24	0.07
4	3000	3.47	0.16
5	4000	4.53	0.30
6	5000	5.72	0.43
7	6000	6.88	0.62
8	7000	9.15	0.83
9	8000	12.60	1.44
10	9000	25.71	3.49
11	10000	39.92	5.15
12	12000	RUSAK	

Tabel 4.4.4 Hasil Rata-Rata Pengujian; kayu Laminasi Tiga Layer





BAB V

ANALISA DAN PERHITUNGAN

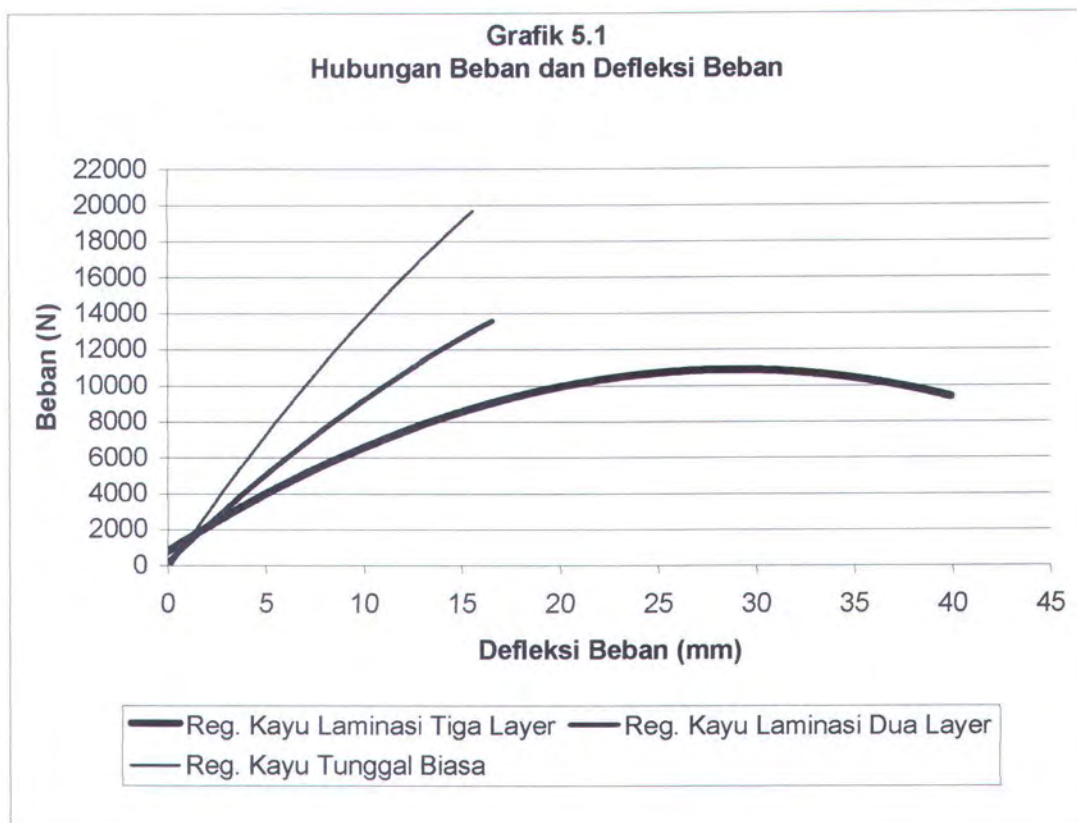
5.1. Analisa Hasil Uji Bending.

Dari hasil pengujian bending ini, akan dilakukan analisa kekuatan dan elastisitas antara papan kayu tunggal biasa dengan papan kayu laminasi.

5.1.1. Hasil Uji Papan Kayu Tunggal Biasa, Kayu Laminasi Dua Layer dan kayu Laminasi Tiga Layer.

No	Beban (N)	Defleksi Beban (mm)		
		Kayu Tunggal Biasa	Kayu Laminasi Dua Layer	Kayu Laminasi Tiga Layer
1	0	0.00	0.00	0.00
2	1000	0.72	0.58	1.13
3	2000	1.42	1.96	2.24
4	3000	2.22	2.86	3.47
5	4000	2.85	3.97	4.53
6	5000	3.51	4.85	5.72
7	6000	4.22	5.82	6.88
8	7000	4.81	7.04	9.15
9	8000	5.48	7.89	12.60
10	9000	6.14	9.83	25.71
11	10000	6.95	11.87	39.92
12	12000	8.20	14.48	RUSAK
13	14000	10.17	16.55	
14	16000	12.47	RUSAK	
15	18000	14.15		
16	20000	15.60		
17	22000	RUSAK		

Tabel 5.1 Hasil Pengujian Papan Kayu Tunggal Biasa, Papan Kayu Laminasi Dua Layer dan Papan Kayu laminasi Tiga Layer.



Dari grafik di atas terlihat bahwa papan kayu tunggal biasa memiliki kekuatan (kemampuan menahan beban) yang lebih besar daripada papan kayu laminasi dua layer maupun papan kayu laminasi tiga layer. Kemampuan papan kayu tunggal biasa ini dapat menahan beban mencapai 20.000 N, sedangkan papan kayu laminasi dua layer hanya memiliki kemampuan menahan beban sampai 14.000 N dan papan kayu laminasi tiga layer hanya mampu menahan beban sampai 10.000 N saja. Hal ini dapat disebabkan pada papan kayu laminasi tiga layer maupun dua layer terdapat struktur yang kurang rigid karena adanya perekatan satu sama lainnya sedangkan pada papan kayu utuh tidak ada. Sehingga papan kayu utuh lebih dapat menahan beban daripada kayu laminasi.

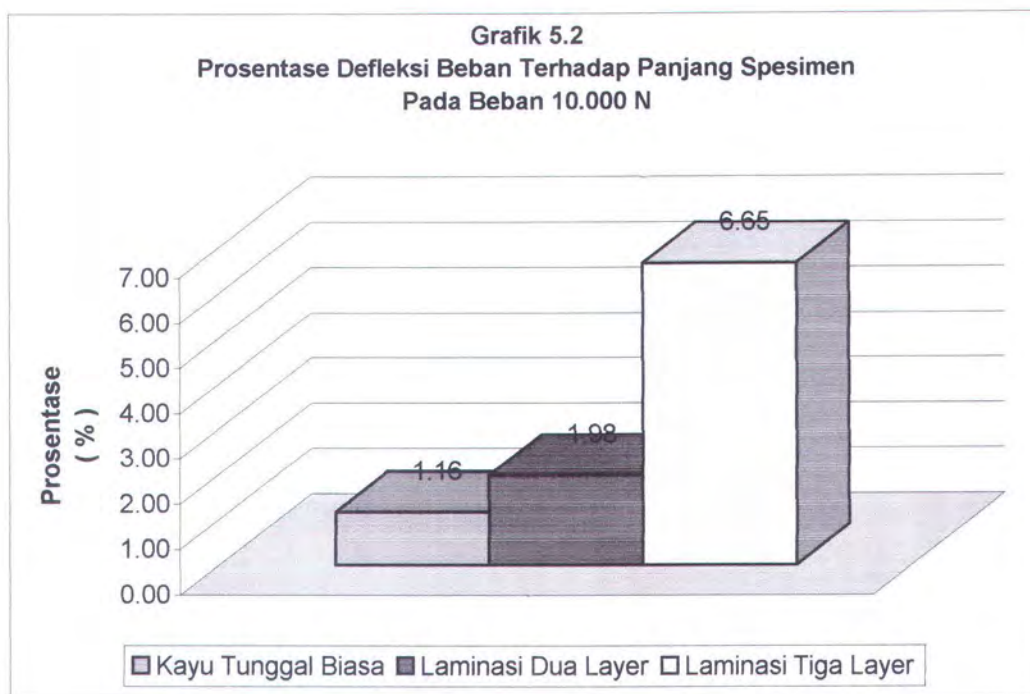


Sifat material kayu tunggal biasa yang memiliki kemampuan menahan beban bending yang lebih besar daripada material kayu laminasi ini sangat berguna bagi konstruksi-konstruksi yang membutuhkan kekuatan yang besar seperti lunas (*Keel*), tiang utama, serta gading besar dan lain-lain.

5.1.2. Perhitungan Prosentase Defleksi Beban Terhadap Panjang Spesimen

No	Beban (N)	Panjang Spesimen (mm)	Prosentase Defleksi Beban Terhadap Panjang Spesimen (%)		
			Kayu Tunggal Biasa	Kayu Laminasi Dua Layer	Kayu Laminasi Tiga Layer
1	0	600	0.00	0.00	0.00
2	1000	600	0.12	0.10	0.19
3	2000	600	0.24	0.33	0.37
4	3000	600	0.37	0.48	0.58
5	4000	600	0.48	0.66	0.76
6	5000	600	0.58	0.81	0.95
7	6000	600	0.70	0.97	1.15
8	7000	600	0.80	1.17	1.53
9	8000	600	0.91	1.32	2.10
10	9000	600	1.02	1.64	4.28
11	10000	600	1.16	1.98	6.65
12	12000	600	1.37	2.41	
13	14000	600	1.69	2.76	
14	16000	600	2.08		
15	18000	600	2.36		
16	20000	600	2.60		

Tabel 5.2 Hasil Prosentase Defleksi Beban Terhadap Panjang Spesimen.



Dari grafik prosentase defleksi beban terhadap panjang spesimen diatas terlihat bahwa papan kayu laminasi tiga layer memiliki kelenturan (Defleksi beban akibat beban bending) yang sangat besar daripada papan kayu tunggal biasa maupun kayu laminasi dua layer. Pada saat beban 10.000 N, papan kayu laminasi tiga layer memiliki prosentase defleksi beban sebesar 6,65 %, untuk papan kayu laminasi dua layer memiliki prosentase defleksi beban sebesar 1,98 %, sedangkan pada papan kayu tunggal biasa prosentase defleksi beban hanya sebesar 1,16 % dari panjang spesimen. Hal ini menunjukkan bahwa kelenturan papan kayu laminasi sangat besar daripada papan kayu tunggal biasa. Sifat lentur ini akan semakin besar dengan bertambahnya jumlah lapisan atau semakin tipis lapisan-lapisan penyusun kayu laminasi, ini dapat dilihat dari hasil perhitungan prosentase defleksi beban yang menunjukkan kenaikan dengan bertambahnya jumlah layer atau lapisan penyusun kayu laminasi. Sifat kayu laminasi ini sangat

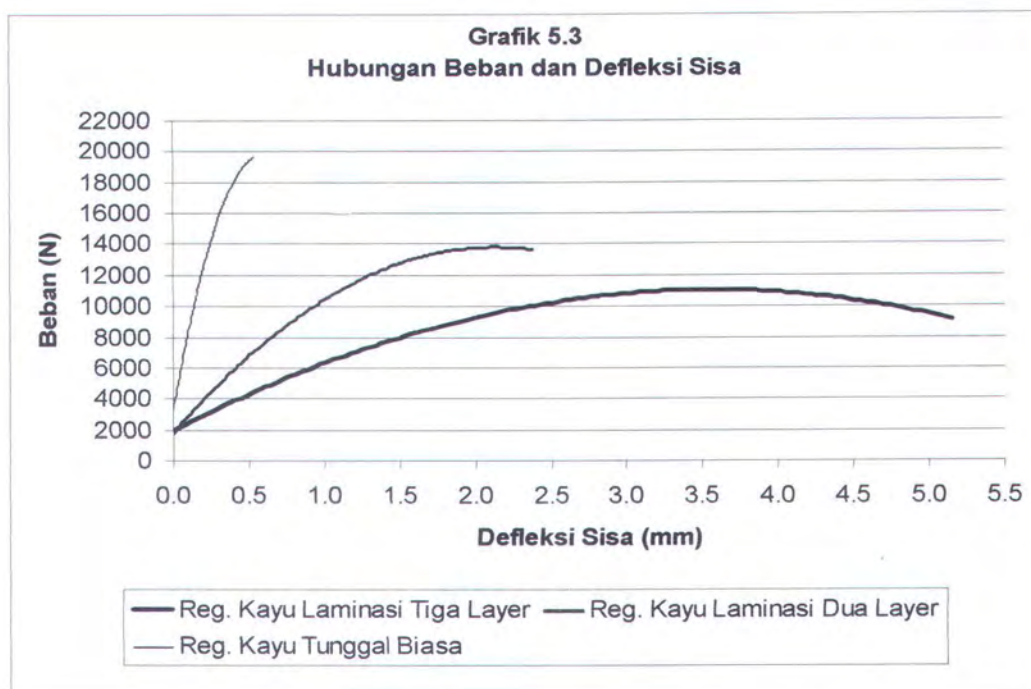


baik untuk konstruksi-konstruksi yang membutuhkan kelenturan tinggi pada saat fitting atau proses produksi suatu konstruksi bangunan.

5.1.3. Hasil Defleksi Sisa Pada Pengujian Papan Kayu Tunggal Biasa, Kayu Laminasi Dua Layer dan kayu Laminasi Tiga Layer.

No	Beban (N)	Defleksi Sisa (mm)		
		Kayu Tunggal Biasa	Kayu Laminasi Dua Layer	Kayu Laminasi Tiga Layer
1	0	0.00	0.00	0.00
2	1000	0.00	0.00	0.05
3	2000	0.00	0.04	0.07
4	3000	0.00	0.07	0.16
5	4000	0.00	0.17	0.30
6	5000	0.00	0.21	0.43
7	6000	0.00	0.28	0.62
8	7000	0.03	0.41	0.83
9	8000	0.07	0.60	1.44
10	9000	0.11	0.83	3.49
11	10000	0.14	1.12	5.15
12	12000	0.18	1.42	
13	14000	0.28	2.38	
14	16000	0.31		
15	18000	0.42		
16	20000	0.54		

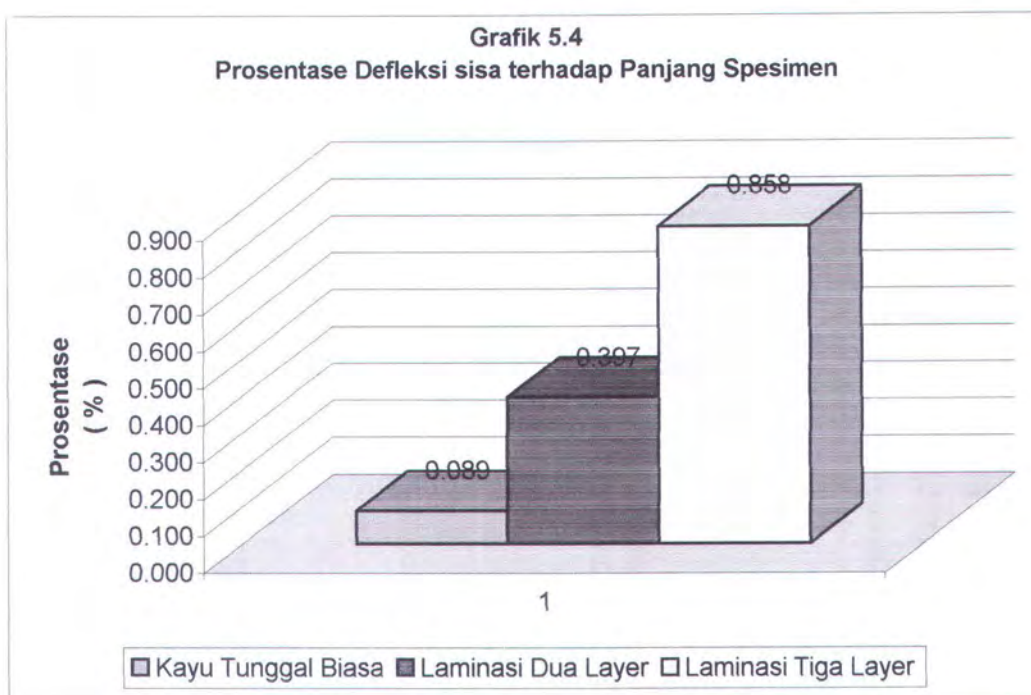
Tabel 5.3 Defleksi Sisa Hasil Pengujian Papan Kayu Tunggal Biasa, Papan Kayu Laminasi Dua Layer dan Papan Kayu Laminasi Tiga Layer.



5.1.4. Perhitungan Prosentase Defleksi Sisa Terhadap Panjang Spesimen.

No	Beban (N)	Panjang Spesimen (mm)	Prosentase Defleksi Sisa Terhadap Panjang Spesimen (%)		
			Kayu Tunggal Biasa	Kayu Laminasi Dua Layer	Kayu Laminasi Tiga Layer
1	0	600	0.000	0.000	0.000
2	1000	600	0.000	0.000	0.008
3	2000	600	0.000	0.007	0.012
4	3000	600	0.000	0.012	0.026
5	4000	600	0.000	0.028	0.050
6	5000	600	0.000	0.035	0.071
7	6000	600	0.000	0.047	0.103
8	7000	600	0.005	0.069	0.138
9	8000	600	0.012	0.100	0.239
10	9000	600	0.018	0.138	0.581
11	10000	600	0.023	0.187	0.858
12	12000	600	0.031	0.236	
13	14000	600	0.047	0.397	
14	16000	600	0.051		
15	18000	600	0.069		
16	20000	600	0.089		

Tabel 5.4 Hasil Prosentase Defleksi Sisa Terhadap Panjang Spesimen.



Dari tabel dan grafik diatas dapat diketahui bahwa papan kayu laminasi tiga layer memiliki prosentase defleksi sisa terhadap panjang specimen yang paling besar daripada papan kayu laminasi dua layer ataupun papan kayu tunggal biasa. Pada papan kayu laminasi tiga layer memiliki besar 0,858 %, papan kayu laminasi dua layer memiliki 0,397 % sedangkan papan kayu tunggal biasa hanya 0,089 %. Hal ini menunjukkan bahwa papan kayu laminasi dua layer memiliki sifat elastisitas (defleksi sisa setelah beban bending diiadakan) yang besar daripada papan kayu laminasi tiga layer akan tetapi lebih rendah dari kayu tunggal biasa.

5.2. Perhitungan Tegangan Bending.

Dalam analisa tegangan akibat beban bending ini akan dilakukan perhitungan tegangan bending untuk tiap-tiap specimen pengujian. Hasil perhitungan ketiga jenis specimen dapat dilihat tegangan terbesarnya.

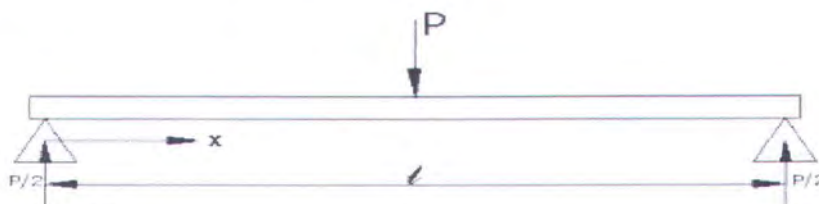


Beban yang diberikan terhadap papan kayu akan menimbulkan momen. Momen terbesar terjadi tepat pada titik tengah dari papan kayu yang ditumpu. Dengan diketahuinya nilai dari momen bending ini, maka bisa dicari besarnya tegangan yang dialami oleh papan kayu tunggal biasa tersebut. Secara teoritis, besarnya tegangan bending papan kayu dapat dicari dengan persamaan :

$$\sigma_b = \frac{M.y}{I}$$

Dimana :
M = Momen bending (Nm)
y = Jarak dari netral aksis (m)
I = Momen Inersia (m⁴)

Dalam kasus ini, M merupakan perkalian antara setengah Beban (P/2) dan jarak titik tengah papan dihitung dari tumpuan.



Pot 1 :

$$V_1 = P/2 \text{ N}$$

$$M = V_1 \cdot X_1 \text{ maksimum pada } L/2$$

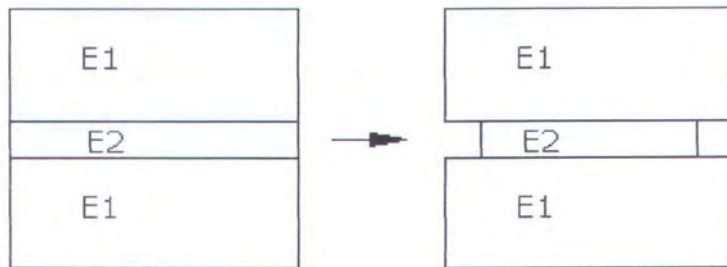
$$= P/2 \cdot L/2$$

$$M_{\max} = \frac{P \cdot L}{4} \text{ Nm}$$

Sedangkan I merupakan momen inersia penampang papan yang berbentuk bujur sangkar segiempat dengan lebar 200 mm dan tinggi 30 mm. Sedangkan I untuk material laminasi dihitung untuk material beda elastisitas dengan memproyeksikan lebar jenis material satu antara kayu dan resin berdasarkan perbandingan modulus elastisitas kayu dan resin.



jika $E_1 > E_2$, Material E2 ditransformasikan ke Material E1



Dimana Hasil Perhitungan I untuk Kayu tunggal Biasa, Kayu Laminasi Dua layer dan Kayu Laminasi Tiga Layer adalah sebagai berikut :

Mat.	b	h	$A = b \cdot h$	y	$A \cdot y$	d	$A \cdot d^2$	$I_o = b \cdot h^3 / 12$
I	0.2	0.03	0.006	0.015	0.00009	0	0	0.00000045

$$Y_1 = \frac{\sum A \cdot y}{\sum A} = 0.015 \text{ m}$$
$$I_{zz} = I_o + \sum A \cdot d^2 = 0.00000045 \text{ m}^4$$

Mat.	b	h	$A = b \cdot h$	y	$A \cdot y$	d	$A \cdot d^2$	$I_o = b \cdot h^3 / 12$
I	0.2	0.0145	0.0029	0.02275	0.000065975	0.00775	1.74181E-07	5.08104E-08
II	0.0238	0.001	0.0000238	0.015	0.000000357	0	0	1.98333E-12
III	0.2	0.0145	0.0029	0.00725	0.000021025	0.00775	1.74181E-07	5.08104E-08
Σ			0.0058238		0.000087357		3.48363E-07	1.01623E-07

$$Y_1 = \frac{\sum A \cdot y}{\sum A} = 0.015 \text{ m}$$
$$I_{zz} = I_o + \sum A \cdot d^2 = 4.45985E-07 \text{ m}^4$$

Mat.	b	h	$A = b \cdot h$	y	$A \cdot y$	d	$A \cdot d^2$	$I_o = b \cdot h^3 / 12$
I	0.2	0.009	0.0018	0.0255	0.0000459	0.0105	1.9845E-07	1.215E-08
II	0.0238	0.001	0.0000238	0.0205	4.879E-07	0.0055	7.1995E-10	1.98333E-12
III	0.2	0.01	0.002	0.015	0.00003	0	0	1.66667E-08
IV	0.0238	0.001	0.0000238	0.0095	2.261E-07	0.0055	7.1995E-10	1.98333E-12
V	0.2	0.009	0.0018	0.0045	0.0000081	0.0105	1.9845E-07	1.215E-08
Σ			0.0056476		0.000084714		3.9834E-07	4.09706E-08

$$Y_1 = \frac{\sum A \cdot y}{\sum A} = 0.015 \text{ m}$$
$$I_{zz} = I_o + \sum A \cdot d^2 = 4.39311E-07 \text{ m}^4$$

Tabel 5.5 Tabel Perhitungan I untuk kayu Laminasi

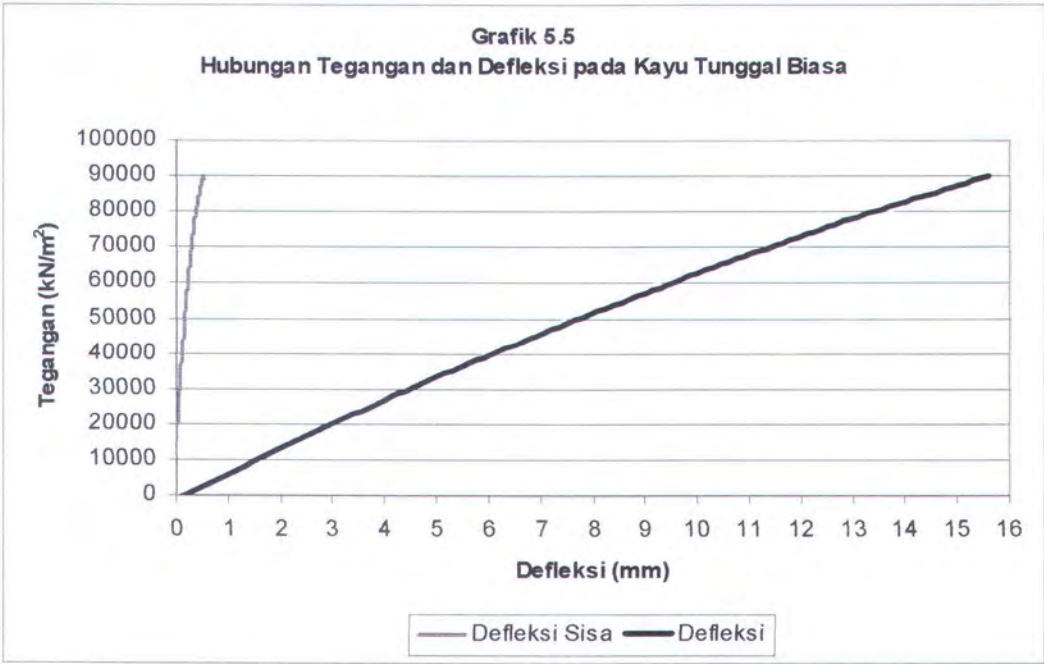
Dari persamaan tersebut diperoleh besarnya tegangan bending yang dialami oleh Papan kayu serta grafik hubungan antara tegangan bending dan defleksi pada masing-masing specimen.



5.2.1. Perhitungan Tegangan Bending Pada Papan Kayu Tunggal Biasa.

Beban (N)	Defleksi (mm)	Defleksi Sisa (mm)	Momen Bending (Nm)	Tegangan Bending (kN/m ²)
0	0.00	0.00	0.0	0.00
1000	0.72	0.00	137.5	4583.33
2000	1.42	0.00	275.0	9166.67
3000	2.22	0.00	412.5	13750.00
4000	2.85	0.00	550.0	18333.33
5000	3.51	0.00	687.5	22916.67
6000	4.22	0.00	825.0	27500.00
7000	4.81	0.03	962.5	32083.33
8000	5.48	0.07	1100.0	36666.67
9000	6.14	0.11	1237.5	41250.00
10000	6.95	0.14	1375.0	45833.33
12000	8.20	0.18	1650.0	55000.00
14000	10.17	0.28	1925.0	64166.67
16000	12.47	0.31	2200.0	73333.33
18000	14.15	0.42	2475.0	82500.00
20000	15.60	0.54	2750.0	91666.67

Tabel 5.6 Defleksi, Momen, dan Tegangan Bending pada papan kayu tunggal biasa.

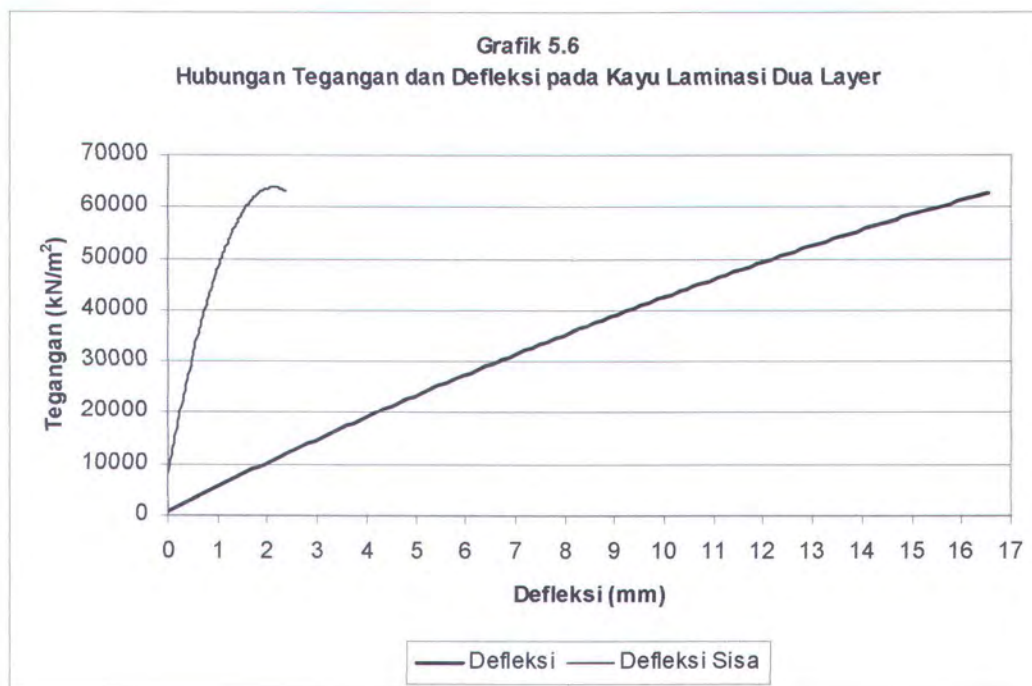




5.2.2. Perhitungan Tegangan Bending Pada Papan Kayu Laminasi Dua Layer

Beban (N)	Defleksi (mm)	Defleksi Sisa (mm)	Momen Bending (Nm)	Tegangan Bending (kN/m^2)
0	0.00	0.00	0.0	0.00
1000	0.58	0.00	137.5	4624.59
2000	1.96	0.04	275.0	9249.19
3000	2.86	0.07	412.5	13873.78
4000	3.97	0.17	550.0	18498.38
5000	4.85	0.21	687.5	23122.97
6000	5.82	0.28	825.0	27747.57
7000	7.04	0.41	962.5	32372.16
8000	7.89	0.60	1100.0	36996.76
9000	9.83	0.83	1237.5	41621.35
10000	11.87	1.12	1375.0	46245.95
12000	14.48	1.42	1650.0	55495.14
14000	16.55	2.38	1925.0	64744.33

Tabel 5.7 Defleksi, Momen, dan Tegangan Bending pada papan kayu Laminasi Dua Layer

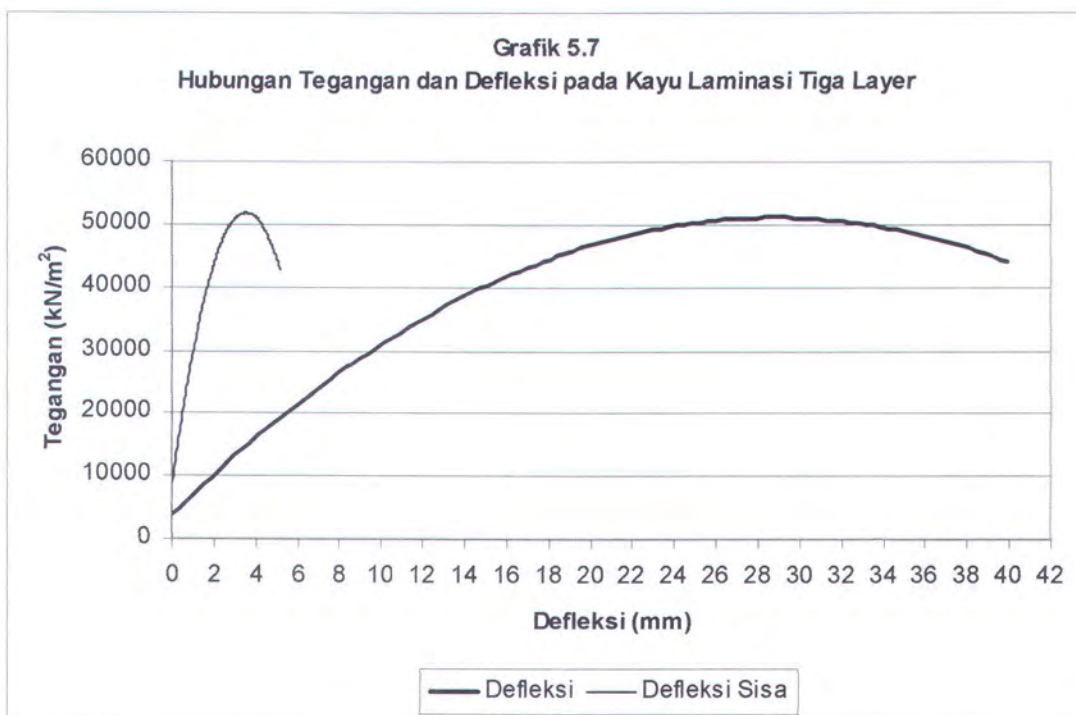




5.2.3. Perhitungan Tegangan Bending Pada Papan Kayu Laminasi Tiga Layer.

Beban (N)	Defleksi (mm)	Defleksi Sisa (mm)	Momen Bending (Nm)	Tegangan Bending (kN/m^2)
0	0.00	0.00	0	0.00
1000	1.13	0.05	137.5	4694.86
2000	2.24	0.07	275	9389.71
3000	3.47	0.16	412.5	14084.57
4000	4.53	0.30	550	18779.43
5000	5.72	0.43	687.5	23474.28
6000	6.88	0.62	825	28169.14
7000	9.15	0.83	962.5	32864.00
8000	12.60	1.44	1100	37558.85
9000	25.71	3.49	1237.5	42253.71
10000	39.92	5.15	1375	46948.57

Tabel 5.8 Defleksi, Momen, dan Tegangan Bending pada papan kayu Laminasi Tiga Layer





5.3. Perhitungan Menggunakan MSC Nastran 4.5

Pada perhitungan dengan menggunakan program MSC Nastran 4.5 ini yang pertama dilakukan adalah pembuatan model specimen untuk MSC Nastran. Input data yang diperlukan dalam MSC Nastran ini berupa beban, mechanical properties dari material penyusun, dan jenis tumpuan. Beban yang diberikan dalam perhitungan ini dibuat sama dengan beban yang dipakai untuk pengujian yaitu beban static bending.

Input mechanical properties kayu dan resin didapat dari literature dan dikorelasikan dengan hasil pengujian tarik untuk resin. Sedangkan tumpuan yang digunakan dalam MSC/NASTRAN yaitu tumpuan engsel dengan pengertian hanya terjadi rotasi pada sumbu z saja dan tumpuan roll dimana translasi dapat terjadi hanya pada sumbu x dan rotasi hanya terjadi pada sumbu z saja.

Adapun material properties yang digunakan adalah sebagai berikut :

Jenis Material	: Kayu Bengkirai (Shorea sp; baulau group)
Density	: 0,68 [kg/m ³]
Modulus Elasticity (E)	: 18.000 Mpa
Moisture Content	: 12 %
Poisson Ratio (v)	: 0,488
E_T/E_L	: 0,096
E_R/E_L	: 0,198
G_{LR}/E_L	: 0,186
G_{LT}/E_L	: 0,149
G_{RT}/E_L	: 0,112
μ_{LR}	: 0,488



$$\mu_{LT} : 0,427$$

$$\mu_{RT} : 0,784$$

$$\mu_{TR} : 0,324$$

$$\mu_{RL} : 0,078$$

$$\mu_{TL} : 0,042$$

Maka, Modulus Elastisitas (E_2) = $3.67E+9$ Pa

Modulus Geser, $G_1 = 3.45E+9$ Pa

$$G_2 = 2.76E+9 \text{ Pa}$$

$$G_3 = 2.07E+9 \text{ Pa}$$

Mechanical Properties Material Resin:

Jenis Material : Epoxy Resin

Category : LM (low modulus)

Density : $0,042 \text{ [lb/in}^3\text{]}$

Modulus Elasticity (E) : $2206,32 \text{ Mpa}$

Poisson Ratio (ν) : $0,43$

Shear Modulus (G) : $G_m = E_m / 2(1 + \nu_m)$

$$: 760,69 \text{ MPa}$$

Data-data ini diperoleh dari literature (lampiran) yang nilainya tidak terlalu berbeda dengan hasil pengujian yang dilakukan pada material resin (lampiran).

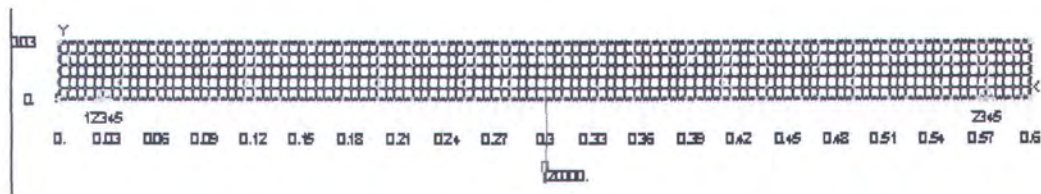
5.3.1 Pembuatan Model Spesimen Untuk MSC Nastran 4.5

Model yang digunakan dalam MSC Nastran memiliki dimensi ukuran yang sama dengan dimensi specimen pada pengujian. Ukuran specimen dengan panjang 600 mm, lebar 200 mm, dan tinggi 30 mm dengan letak tumpuan 25 mm

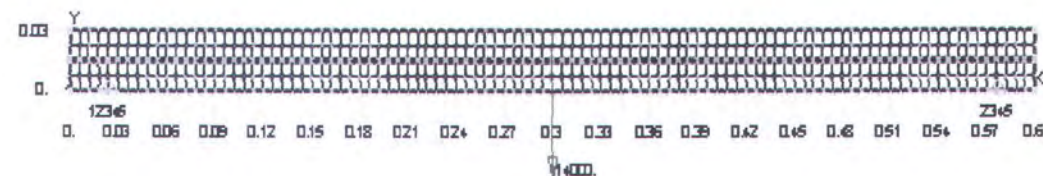


dari ujung-ujungnya atau dengan jarak tumpuan 550 mm. Untuk Kayu Laminasi tebal perekatan atau lem diasumsikan setebal 1 mm. Model dibuat dengan *type isotropic* dua dimensi dengan tujuan pembuatan lebih sederhana dan penentuan element secara memanjang tampak samping akan terlihat.

Model Untuk Kayu Tunggal Biasa



Model Untuk Kayu Laminasi Dua Layer



Model Untuk Kayu Laminasi Tiga Layer



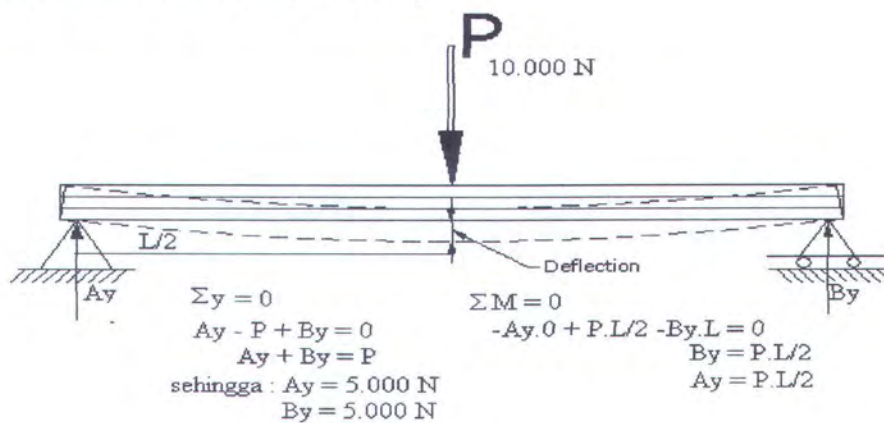
5.3.2 Verifikasi Hasil Perhitungan MSC/NASTRAN

Hasil perhitungan MSC/Nastran harus dilakukan proses validasi atau verifikasi untuk mengetahui keakuratan hasil perhitungan. Proses validasi ini dapat dilakukan dengan beberapa macam cara seperti perhitungan reaksi tumpuan dimana perhitungan ini harus sesuai hukum $\Sigma F = 0$, dan dengan melakukan

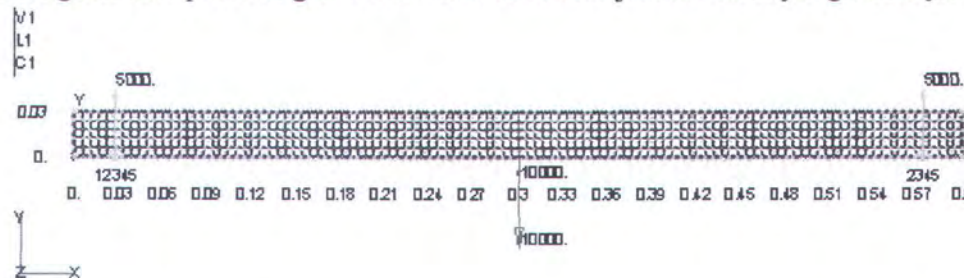


perhitungan menggunakan variasi jumlah element untuk MSC/Nastran sampai didapat nilai yang konvergen yaitu suatu nilai yang tidak mengalami perubahan secara significant dengan berubahnya jumlah element.

Pada perhitungan reaksi tumpuan didapat :



Sedangkan dari perhitungan MSC/Nastran menunjukkan hasil yang sama yaitu :



Dari variasi jumlah element untuk perhitungan MSC/Nastran didapatkan jumlah element minimum yang memiliki nilai konvergen dan mendekati nilai hasil pengujian yaitu:

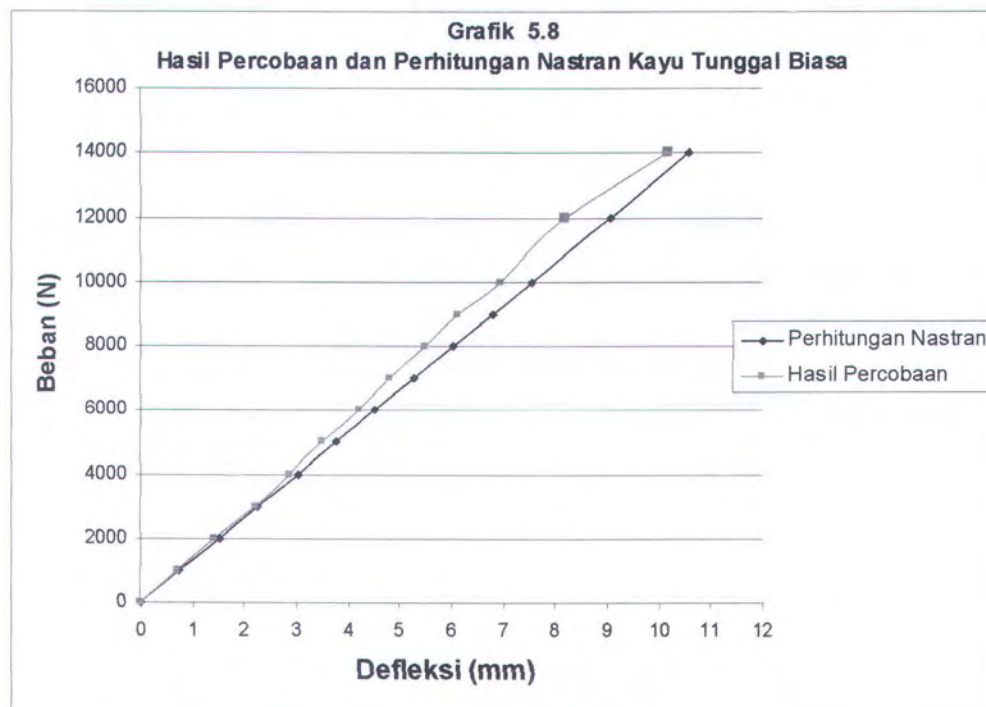
1. Untuk material kayu tunggal biasa didapatkan jumlah element sebanyak 500 element yang tersusun hanya dari material kayu.
2. Untuk material kayu laminasi dua layer didapatkan 600 element yang terdiri dari 400 element kayu dan 200 element resin.
3. Untuk material kayu laminasi tiga layer didapatkan 800 element yang terdiri dari 600 element kayu dan 200 element resin.



5.3.3 Perhitungan Ms Nastran Untuk Kayu Tunggal Biasa

No	Beban (N)	Defleksi Beban (mm)	
		Hasil Percobaan	Hasil Perhitungan Nastran
1	0	0.00	0.000
2	1000	0.72	0.755
3	2000	1.42	1.510
4	3000	2.22	2.265
5	4000	2.85	3.020
6	5000	3.51	3.774
7	6000	4.22	4.529
8	7000	4.81	5.284
9	8000	5.48	6.039
10	9000	6.14	6.794
11	10000	6.95	7.549
12	12000	8.20	9.059
13	14000	10.17	10.568
14	16000	12.47	12.078
15	18000	14.15	13.588
16	20000	15.60	15.098

Tabel 5.9 Hasil Pengujian dan Hasil Perhitungan Nastran Kayu Tunggal Biasa

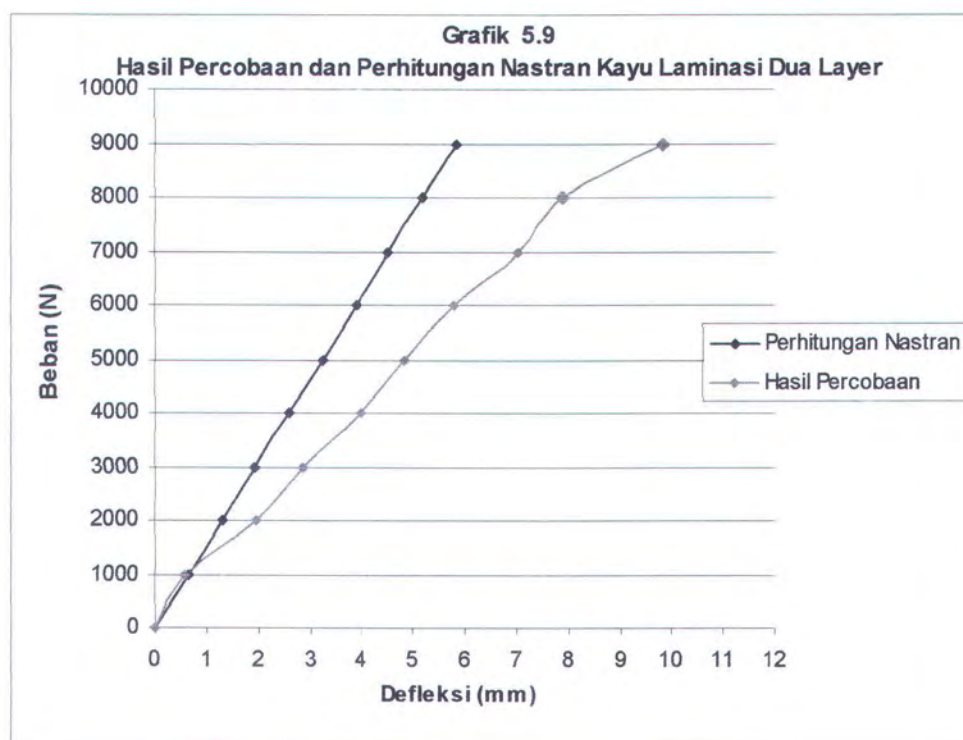




5.3.4 Perhitungan Ms Nastran Untuk Kayu Laminasi Dua Layer.

No	Beban (N)	Defleksi Beban (mm)	
		Hasil Percobaan	Hasil Perhitungan Nastran
1	0	0.00	0.000
2	1000	0.58	0.649
3	2000	1.96	1.297
4	3000	2.86	1.946
5	4000	3.97	2.594
6	5000	4.85	3.243
7	6000	5.82	3.891
8	7000	7.04	4.540
9	8000	7.89	5.188
10	9000	9.83	5.837
11	10000	11.87	6.486
12	12000	14.48	7.783
13	14000	16.55	9.080

Tabel 5.10 Hasil Pengujian dan Hasil Perhitungan Nastran Kayu Laminasi Dua Layer.

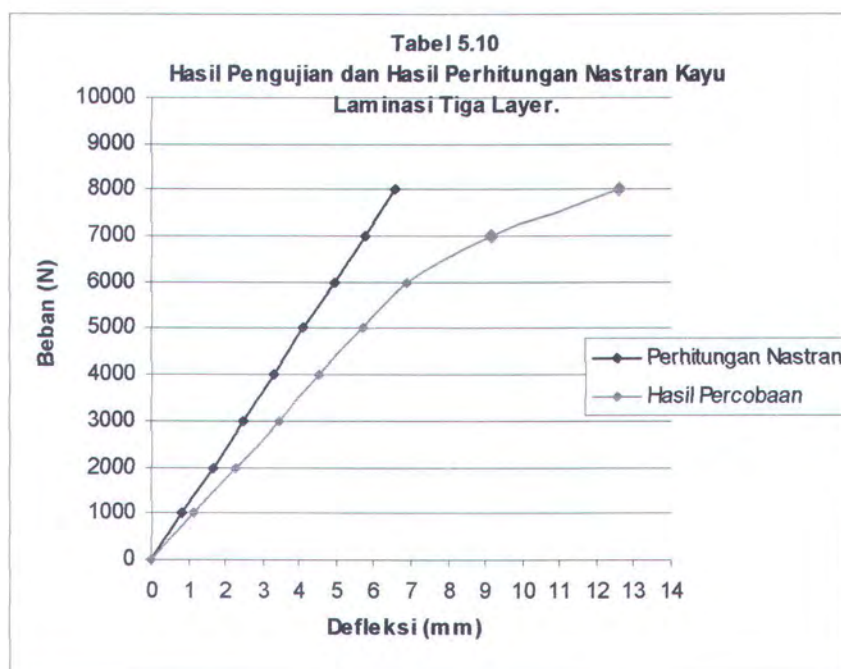




5.3.5 Perhitungan Ms Nastran Untuk Kayu Laminasi Tiga Layer.

No	Beban (N)	Defleksi Beban (mm)	
		Hasil Percobaan	Hasil Perhitungan Nastran
1	0	0.00	0.000
2	1000	1.13	0.822
3	2000	2.24	1.643
4	3000	3.47	2.465
5	4000	4.53	3.286
6	5000	5.72	4.108
7	6000	6.88	4.929
8	7000	9.15	5.751
9	8000	12.60	6.572
10	9000	25.71	7.394
11	10000	39.92	8.215

Tabel 5.11 Hasil Pengujian dan Hasil Perhitungan Nastran Kayu Laminasi Tiga Layer.



Dari ketiga grafik diatas dapat dilihat bahwa adanya perbedaan antara hasil pengujian dan hasil perhitungan MSC Nastran. Hal ini disebabkan oleh adanya perbedaan data *mechanical properties* material kayu atau resin sebagai



material orthotrop untuk MSC/NASTRAN dengan modulus nyata pada kayu dan resin saat pengujian. Pada perhitungan MSC/NASTRAN didapatkan defleksi material secara linier. Hal ini menunjukkan bahwa perhitungan menggunakan MSC/NASTRAN untuk material-material elastis. Berbeda dengan hasil pengujian, defleksi secara linier hanya terjadi pada beban 0 – 2000 N, untuk beban selebihnya defleksi yang terjadi berupa polyline yang menunjukkan material kayu mengalami perubahan dari elastis ke plastis. Perbedaan ini disebabkan pada MSC Nastran program dibuat untuk daerah elastis tanpa memperhatikan sifat plastis material sehingga hasil yang ditampilkan mendekati hasil untuk sifat elastis material. Sedangkan pada hasil pengujian dimungkinkan pada saat terjadi perubahan defleksi yang begitu besar diakibatkan pada saat beban tersebut material sudah menunjukkan tanda kerusakan awal berupa timbulnya keretakan pada kayu dan terjadinya pergeseran antar lapisan pada daerah perekatan akibat beban sehingga material sudah tidak rigid lagi. Hal ini yang menyebabkan perbedaan antara perhitungan MSC Nastran dan hasil pengujian.

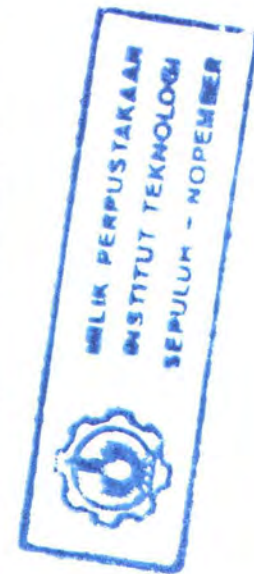
Pada material kayu tunggal biasa terlihat perubahan besar pada defleksi terjadi pada saat beban mencapai 12.000 – 14.000 N yang menunjukkan saat yang sama terjadi awal kerusakan akibat beban bending. Pada material kayu laminasi dua layer terlihat perubahan besar pada defleksi terjadi pada saat beban mencapai 8.000 – 9.000 N yang menunjukkan saat yang sama terjadi awal kerusakan akibat beban bending sedangkan pada material kayu laminasi tiga layer kerusakan terjadi pada saat beban mencapai 7.000 – 8.000 N.



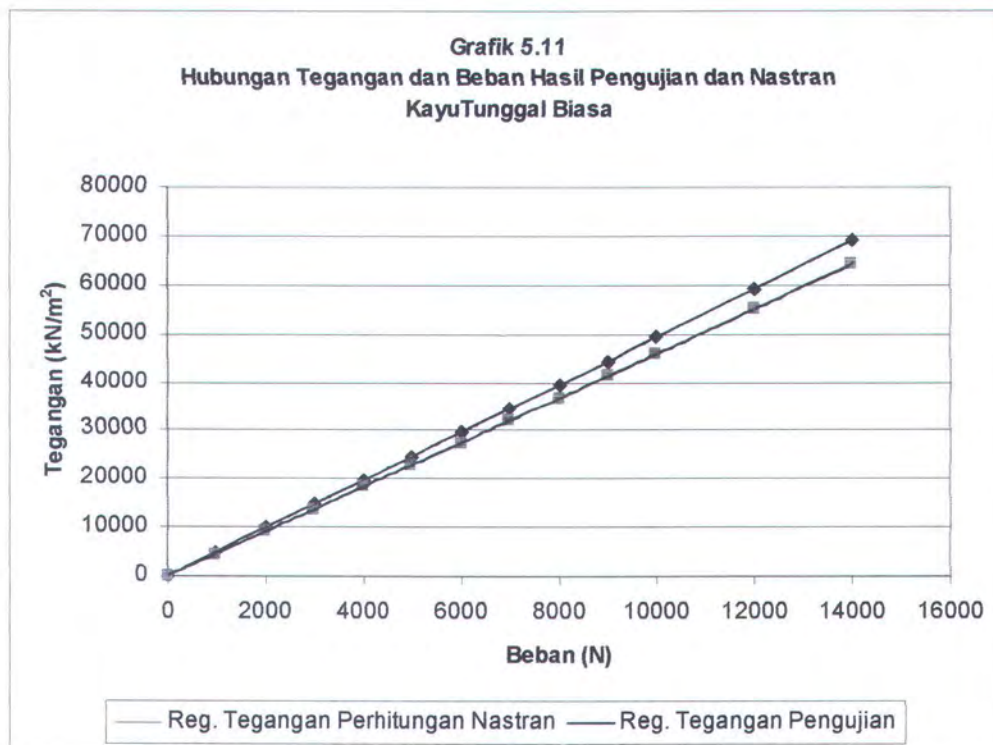
5.4 Perhitungan Tegangan Bending Dengan MSC Nastran 4.5

5.4.1. Kayu Tunggol Biasa

Beban (N)	Tegangan Bending (kN/m^2)	
	Pengujian	Perhitungan Nastran.
0	0.00	0.00
1000	4583.33	4926.48
2000	9166.67	9852.96
3000	13750.00	14779.44
4000	18333.33	19705.92
5000	22916.67	24632.40
6000	27500.00	29558.88
7000	32083.33	34485.36
8000	36666.67	39411.84
9000	41250.00	44338.32
10000	45833.33	49264.80
12000	55000.00	59117.76
14000	64166.67	68970.71
16000	73333.33	78823.67
18000	82500.00	88676.63
20000	91666.67	98529.59



Tabel 5.12 Perhitungan Tegangan Bending Pada Pengujian dan Hasil Perhitungan Nastran 4.5 Pada Kayu Tunggol Biasa

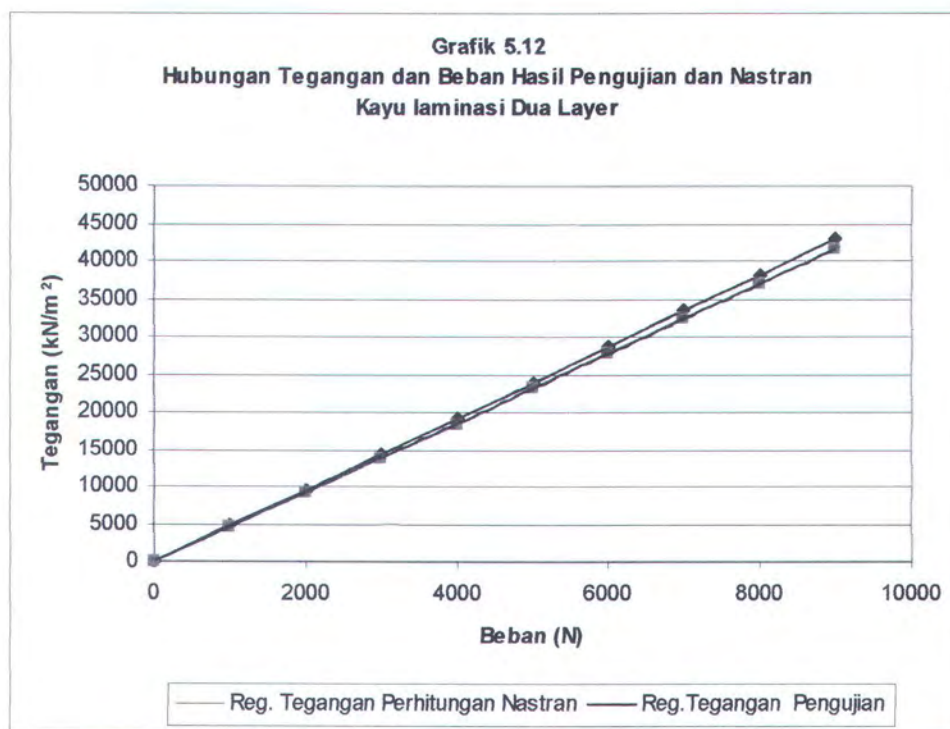




5.4.2. Kayu Laminasi Dua Layer

Beban (N)	Tegangan Bending (kN/m ²)	
	Pengujian	Perhitungan Nastran.
0	0.00	0.00
1000	4624.59	4771.23
2000	9249.19	9542.46
3000	13873.78	14313.69
4000	18498.38	19084.92
5000	23122.97	23856.15
6000	27747.57	28627.38
7000	32372.16	33398.61
8000	36996.76	38169.84
9000	41621.35	42941.07
10000	46245.95	47712.30
12000	55495.14	57254.76
14000	64744.33	66797.22

Tabel 5.13 Perhitungan Tegangan Bending Pada Pengujian dan Hasil Perhitungan Nastran 4.5 Pada Kayu Laminasi Dua Layer.

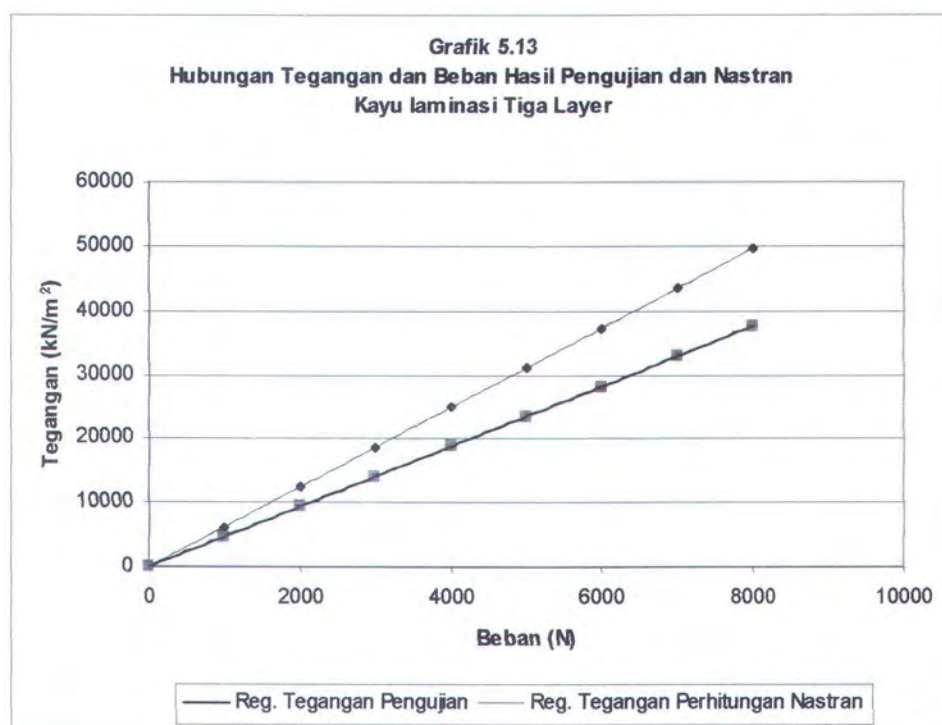




5.4.3. Kayu Laminasi Tiga Layer

Beban (N)	Tegangan Bending (kN/m^2)	
	Pengujian	Perhitungan Nastran.
0	0.00	0.00
1000	4694.86	6214.11
2000	9389.71	12428.22
3000	14084.57	18642.32
4000	18779.43	24856.43
5000	23474.28	31070.54
6000	28169.14	37284.65
7000	32864.00	43498.76
8000	37558.85	49712.86
9000	42253.71	55926.97
10000	46948.57	62141.08

Tabel 5.14 Perhitungan Tegangan Bending Pada Pengujian dan Hasil Perhitungan Nastran 4.5 Pada Kayu Laminasi Tiga Layer.



Dari grafik perhitungan tegangan antara hasil pengujian dan perhitungan dengan MSC nastran dapat dilihat bahwa pada perhitungan untuk material kayu tunggal biasa, perbedaan besarnya perhitungan antara pengujian dan perhitungan tidak terlalu besar dengan kata lain memiliki nilai yang berdekatan. Akan tetapi



perbedaan nilai tegangan antara pengujian dan perhitungan dengan MSC Nastran semakin besar pada material kayu laminasi yang memiliki defleksi sangat besar. Hal ini disebabkan karena perhitungan menggunakan Mekanika Teknik hanya berlaku untuk defleksi-defleksi kecil saja (*small deformation*), sedangkan untuk material-material dengan defleksi yang besar perhitungan tegangan lebih akurat dengan menggunakan metode elemen hingga (*finite elemen method*) yang salah satunya terdapat dalam MSC NASTRAN. Jumlah element dan nodal untuk satu material juga berpengaruh terhadap akurasi hasil antara satu specimen dengan specimen lainnya, semakin besar jumlah element dan nodal maka semakin besar pula akurasi hasil yang didapatkan. Kesulitan menentukan luasan masing-masing luasan element untuk material kayu laminasi yang terdiri dari dua bahan yang berbeda yaitu kayu dan resin juga berpengaruh terhadap akurasi hasil yang didapatkan.

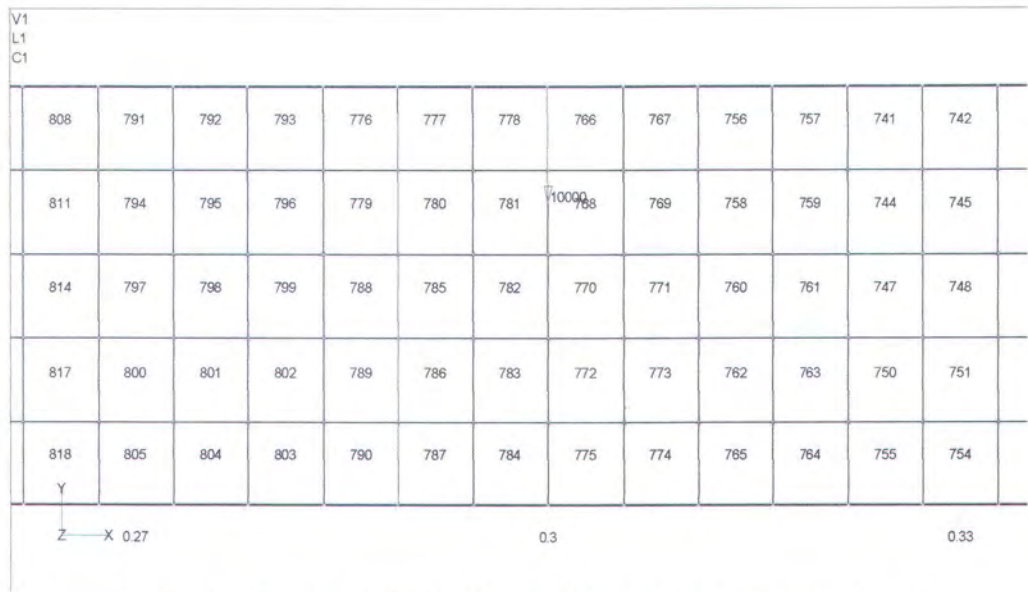
5.5 Perhitungan Tegangan Bending Dengan MSC Nastran 4.5 Tiap Element Secara Melintang.

Pada perhitungan dengan MSC Nastran ini akan ditunjukkan besarnya tegangan untuk tiap element penyusun secara melintang searah ketebalan dan searah pembebanan. Pada material kayu tunggal biasa secara melintang searah ketebalan dibagi menjadi 6 element atau ID dan pada material kayu laminasi dua layer dibagi menjadi 10 element atau ID dengan 8 element untuk kayu dan 2 element untuk resin sedangkan pada material kayu laminasi tiga layer dibagi menjadi 13 element dimana 9 element untuk tiga lapisan kayu dan 4 element untuk dua lapisan resin.



5.5.1 Kayu Tunggal Biasa

Pada kayu tunggal biasa element hanya terdiri dari satu jenis material property yaitu kayu. Dimana pembagian element dan letak tegangan maksimum dapat dilihat pada gambar berikut ini :



Gambar 5.1 Gambar pembagian Element Material Secara Melintang Searah ketebalan dan pembebanan kayu tunggal biasa

Pada pembebanan 10.000 N

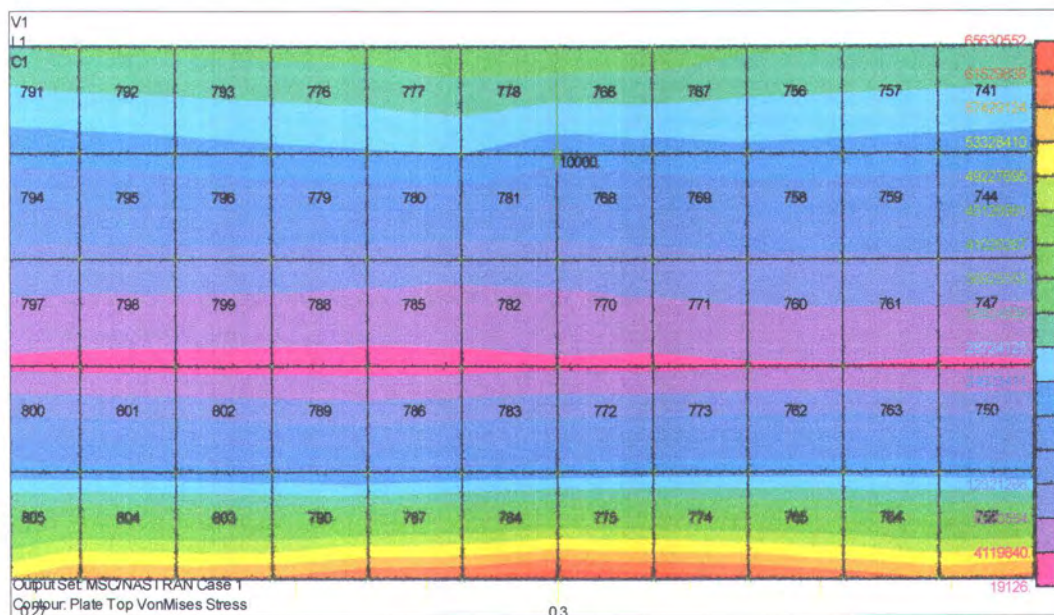
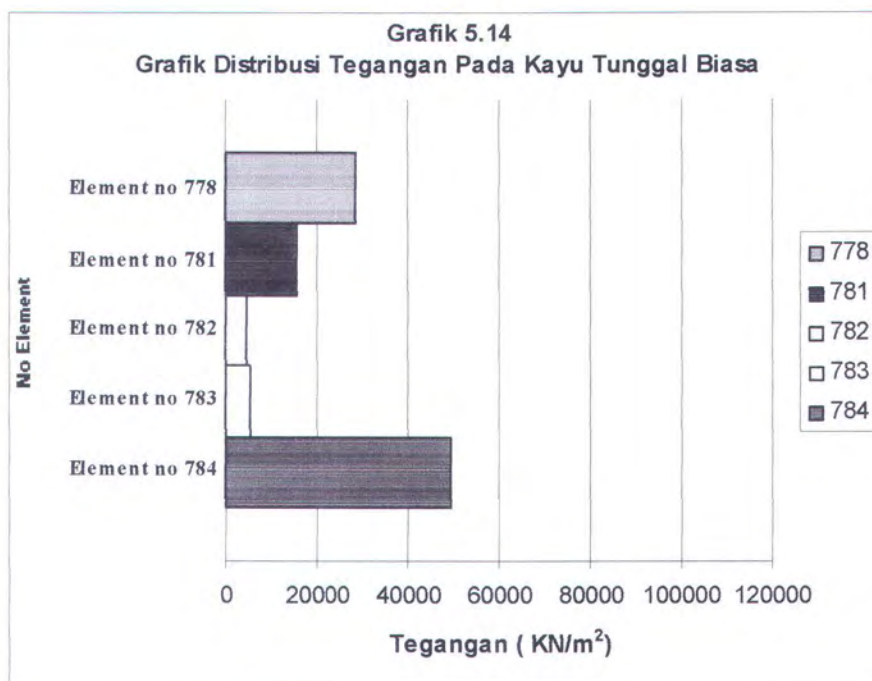
Maks element no 784 sebesar 49.264,80 KN/m²

Min element no 1041 sebesar 15.886,03 N/m²

Sedangkan Nilai tegangan untuk Element yang lain sejajar dengan Element tegangan maksimum adalah sebagai berikut

No Element	Besar Tegangan (KN/m ²)
778	28436.78
781	15358.61
782	4503.72
783	5401.06
784	49264.80

Tabel 5.15 Tabel Tegangan Tiap Element Kayu Tunggal Biasa



Gambar 5.2 Gambar Hasil Running Untuk Tegangan pada MSC Nastran

5.5.2 Kayu Laminasi Dua Layer

Pada kayu laminasi dua layer element terdiri dari dua jenis material property yaitu kayu dan resin. Dimana pembagian element dan letak tegangan maksimum dapat dilihat pada gambar berikut ini



V1											
L1											
C1											
	807	808	809	801	802	803	799	797	795	793	787
							10000				
	812	811	810	806	805	804	800	798	796	794	792
	1212	1208	1207	1206	1203	1202	1199	1197	1195	1193	1192
	1007	1008	1009	1001	1002	1003	999	997	995	993	987
	1012	1011	1010	1006	1005	1004	1000	998	996	994	992
	Y										
	Z	X									
		0.27					0.3				0.33

Gambar 5.3 Gambar pembagian Element Material Secara Melintang Searah ketebalan dan pembebanan kayu laminasi dua layer

Pada pembebanan 10.000 N

Maks element no 1000 sebesar 47.712,30 KN/m²

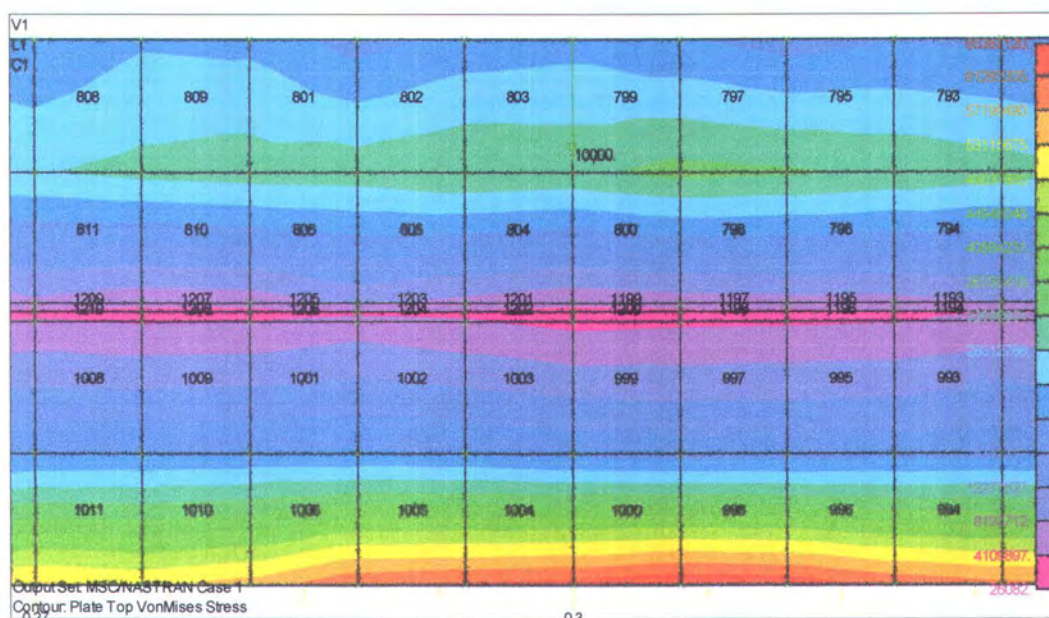
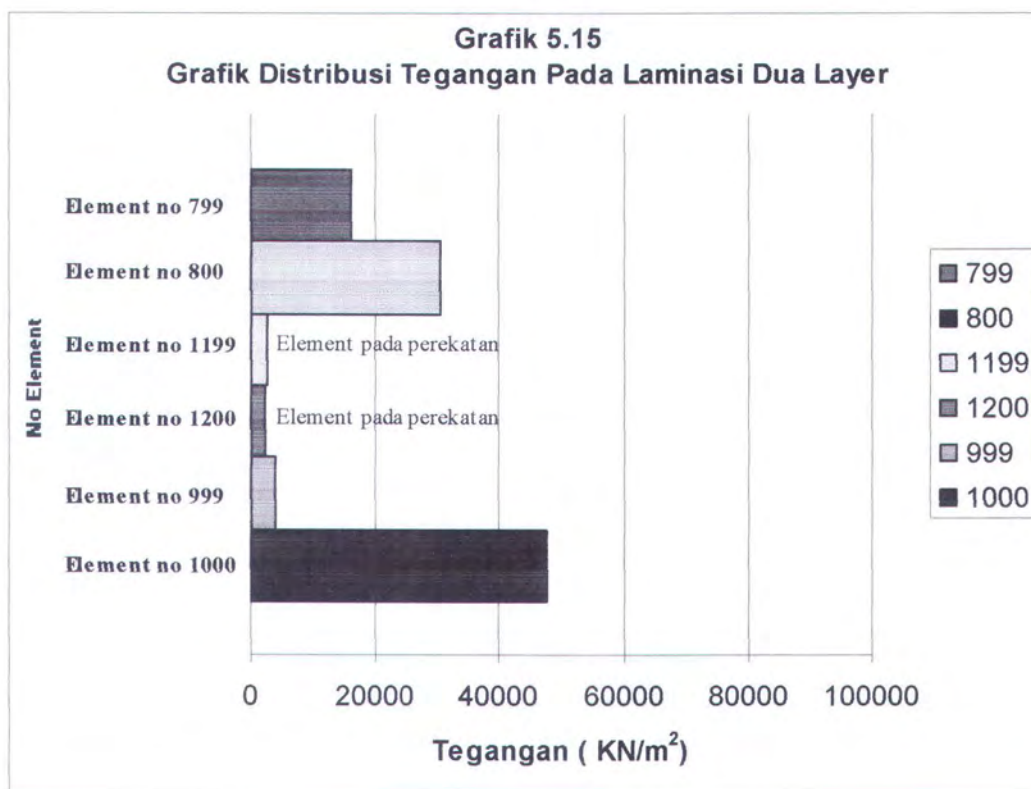
Min element no 899 sebesar 32.501,97 N/m²

Sedangkan Nilai tegangan untuk Element yang lain sejajar dengan Element

tegangan maksimum adalah sebagai berikut

No Element	Besar Tegangan (KN/m ²)
799	16157.007
800	30643.88
1199	2536.08
1200	2402.44
999	3739.813
1000	47712.30

Tabel 5.16 Tabel Tegangan Tiap Element Kayu Laminasi Dua layer

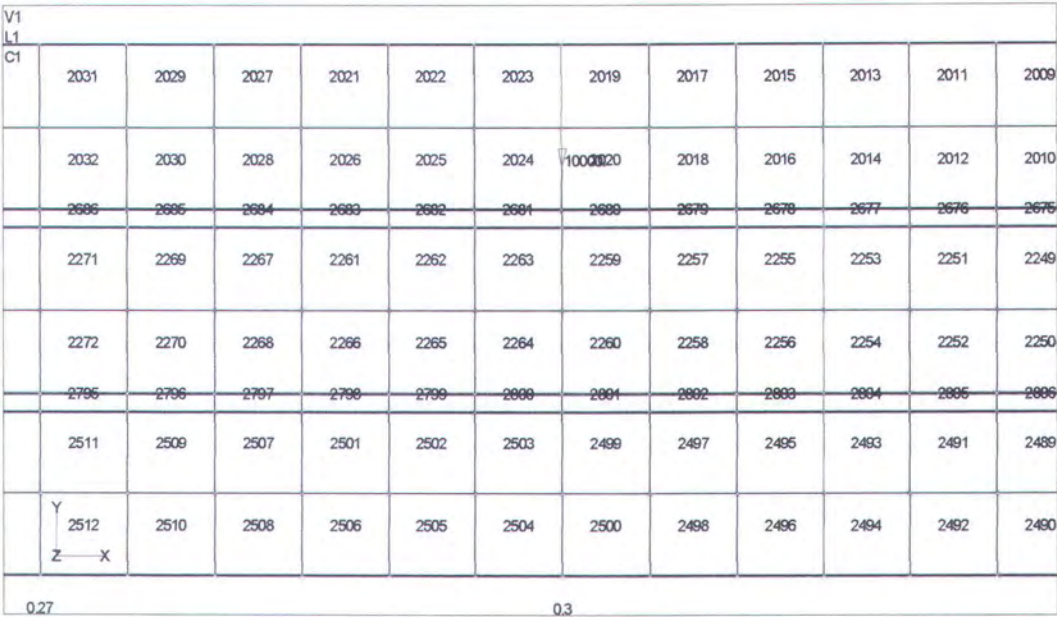


Gambar 5.4 Gambar Hasil Running Untuk Tegngan pada MSC Nastran



5.5.3 Kayu Laminasi Tiga Layer.

Pada kayu laminasi tiga layer element terdiri dari dua jenis material property yaitu kayu dan resin. Dimana pembagian element dan letak tegangan maksimum dapat dilihat pada gambar berikut ini :



Gambar 5.5 Gambar pembagian Element Material Secara Melintang Searah ketebalan dan pembebanan kayu laminasi tiga layer.

Pada pembebanan 10.000 N

Maks element no 2500 sebesar 62.276,5 KN/m²

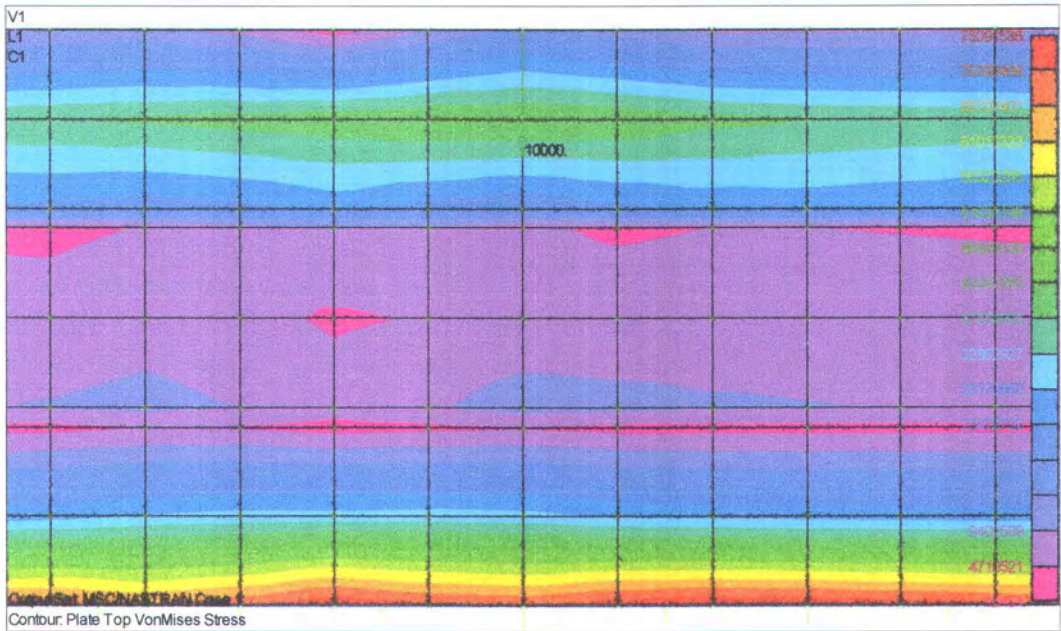
Min element no 1903 sebesar 17.111,04 N/m²

Sedangkan Nilai tegangan untuk Element yang lain sejajar dengan Element tegangan maksimum adalah sebagai berikut

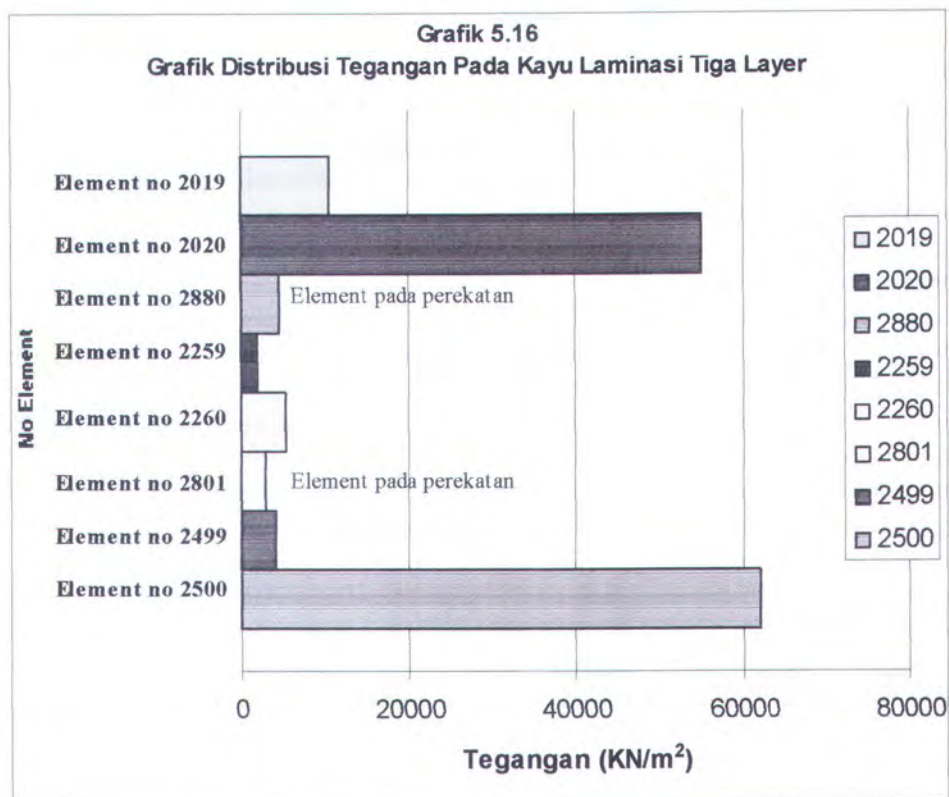


No Element	Besar Tegangan (KN/m ²)
2019	10560.05
2020	55029.988
2880	4528.632
2259	1886.861
2260	5281.618
2801	2955.176
2499	4105.216
2500	62141.08

Tabel 5.17 Tabel Tegangan Tiap Element Kayu Laminasi tiga layer.



Gambar 5.6 Gambar Hasil Running Untuk Tegngan pada MSC Nastran



Dari ketiga grafik diatas dapat diambil kesimpulan bahwa tegangan yang bekerja pada perekat atau resin untuk kayu laminasi dua layer adalah yang terkecil yaitu sebesar $2.402,44 \text{ KN/m}^2$. Hal ini disebabkan karena letak resin berada pada Netral Aksis yang secara teori akan menahan beban paling minimum. Sedangkan pada material kayu laminasi tiga layer, tegangan yang bekerja pada resin lebih besar daripada yang bekerja pada kayu laminasi dua layer yaitu sebesar $4.528,632 \text{ KN/m}^2$. Ini membuktikan bahwa semakin banyak layer atau lapisan yang menyusun sebuah kayu laminasi maka semakin kecil kekuatannya karena secara teori semakin besar pula tegangan yang bekerja pada perekat dan memungkinkan terjadinya kerusakan juga semakin besar.



Dari analisa-analisa kayu laminasi diatas dapat disimpulkan bahwa kayu laminasi dua layer memiliki sifat yang paling baik diantara kayu laminasi lainnya sehingga untuk konstruksi-konstruksi laminasi dianjurkan menggunakan material laminasi dua layer. Hal ini dapat dijelaskan bahwa pada kayu laminasi dua layer tegangan yang bekerja pada daerah pengeleman lebih kecil dari laminasi lebih dari dua layer, sehingga secara teori proses terjadinya kerusakan awal akibat tegangan bending lebih kecil. Sifat ini dapat dijelaskan bahwa pada material lamiansi tiga layer atau lebih secara teori dan terbukti jika pada daerah pengeleman tegangan yang bekerja lebih besar. Dimana semakin banyak jumlah lapisan maka semakin jauh pula letak daerah pengeleman dari netral axis sehingga semakin besar juga tegangan yang bekerja pada daerah tersebut dan semakin besar pula kemungkinan kerusakan awal yang akan terjadi akibat tegangan bending. Sifat ini juga didukung oleh kekuatan (kemampuan menahan beban) yang lebih besar daripada kayu laminasi tiga layer atau lebih.

5.6. Pengaruh Letak Kerusakan Awal Pada Material Kayu Laminasi Terhadap Kekuatannya.

Material kayu sebagai material orthotrop memiliki sifat yang sangat berbeda dengan material isotrop maupun anisotropy. Pada material kayu sebagai material orthotrop kekuatan sangat dipengaruhi oleh arah serat, cacat serat, sudut serat, dan lain-lain. Pada material kayu laminasi dua fenomena kerusakan yaitu kerusakan pada kayu dan kerusakan pada lem akibat pergeseran. Kayu laminasi yang mengalami kerusakan pertama pada perekatannya dapat disebabkan antara lain oleh beban pengujian berulang dan bertingkat yang dapat menimbulkan slip



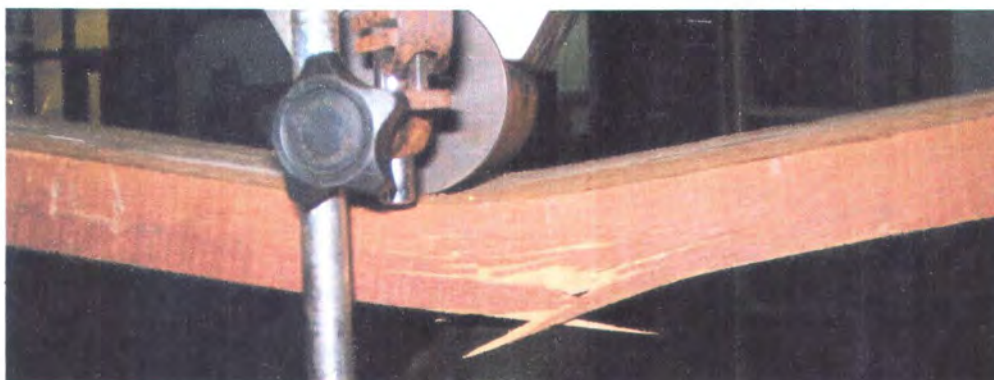
atau pergeseran antar lapisan. Dapat juga diakibatkan karena serat kayu searah dengan arah pengeleman sehingga kayu dengan arah serat yang sama memiliki kekuatan yang lebih besar daripada daya rekat perekat sehingga kerusakan pertama terjadi pada perekatan.

Kemungkinan kerusakan kedua terjadi pada kayu penyusun konstruksi kayu laminasi yang dapat berupa timbulnya keretakan pada serat kayu. Hal ini dapat disebabkan sudut serat penyusun kayu laminasi berbeda dengan dengan arah perekatan sehingga kayu yang memiliki sudut kemiringan arah serat memiliki kekuatan yang lebih rendah daripada daya rekat perekat yang menyebabkan kayu mengalami kerusakan terlebih dahulu.

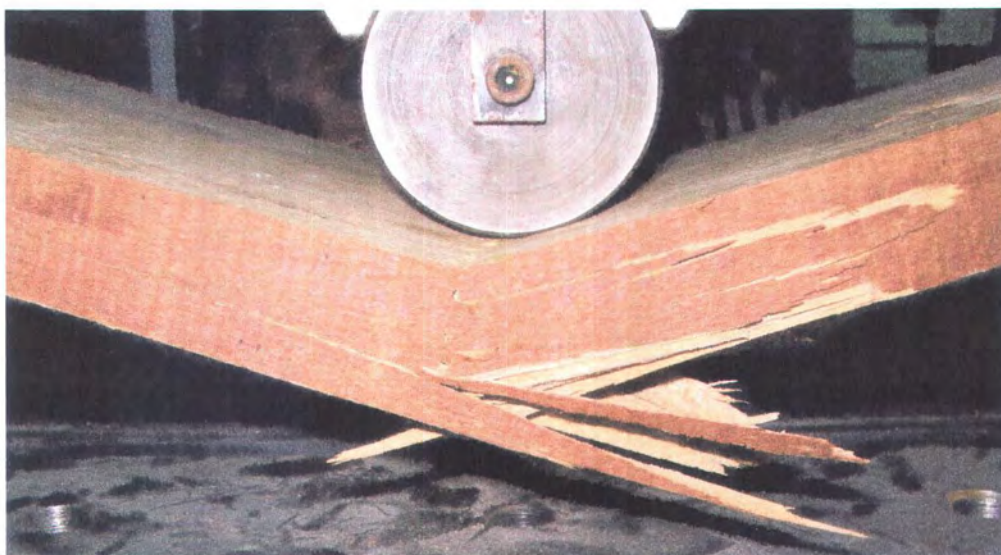
5.6.1 Kerusakan Awal Pada Material Kayu Tunggal Biasa dan Hasil Defleksi Beban Tiap Spesimen Pengujian.



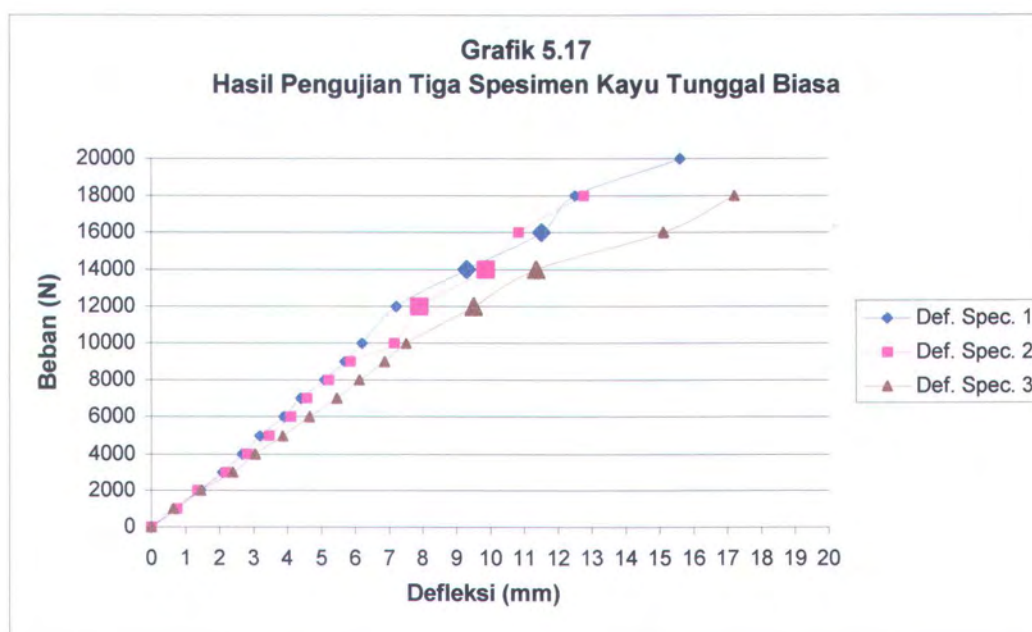
Gambar 5.7 Gambar Spesimen 1 kayu tunggal biasa setelah pengujian



Gambar 5.8 Gambar Spesimen 2 kayu tunggal biasa setelah pengujian

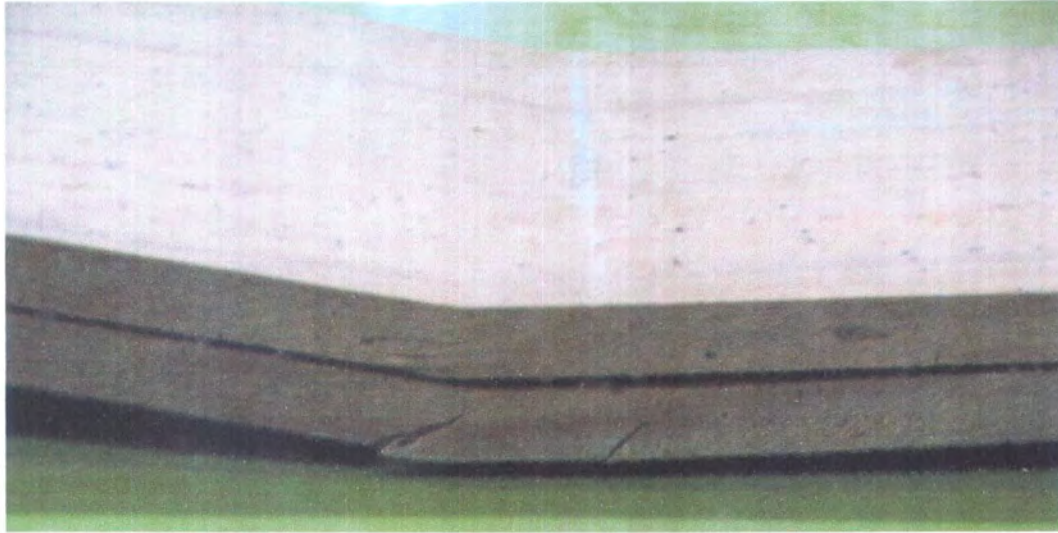


Gambar 5.9 Gambar Spesimen 3kayu tunggal biasa setelah pengujian

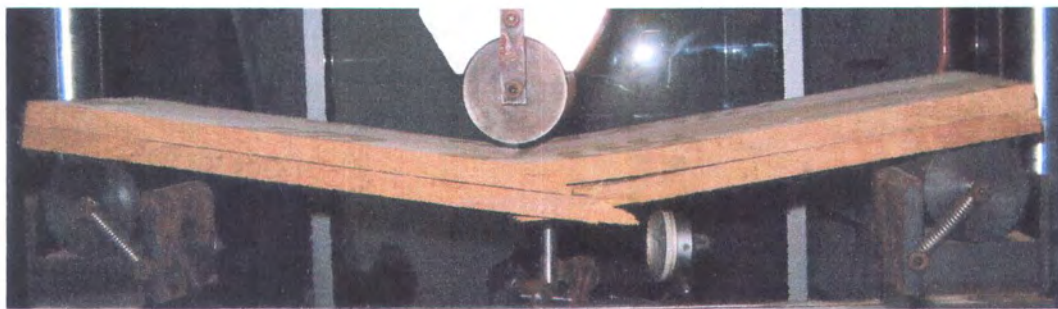




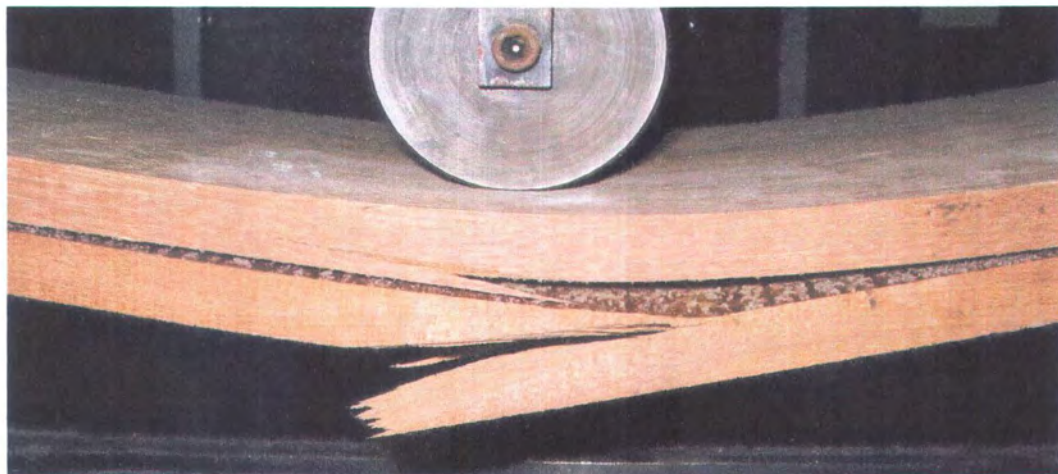
5.6.2 Kerusakan Awal Pada Material Kayu Laminasi Dua Layer dan Hasil Defleksi Beban Tiap Spesimen Pengujian.



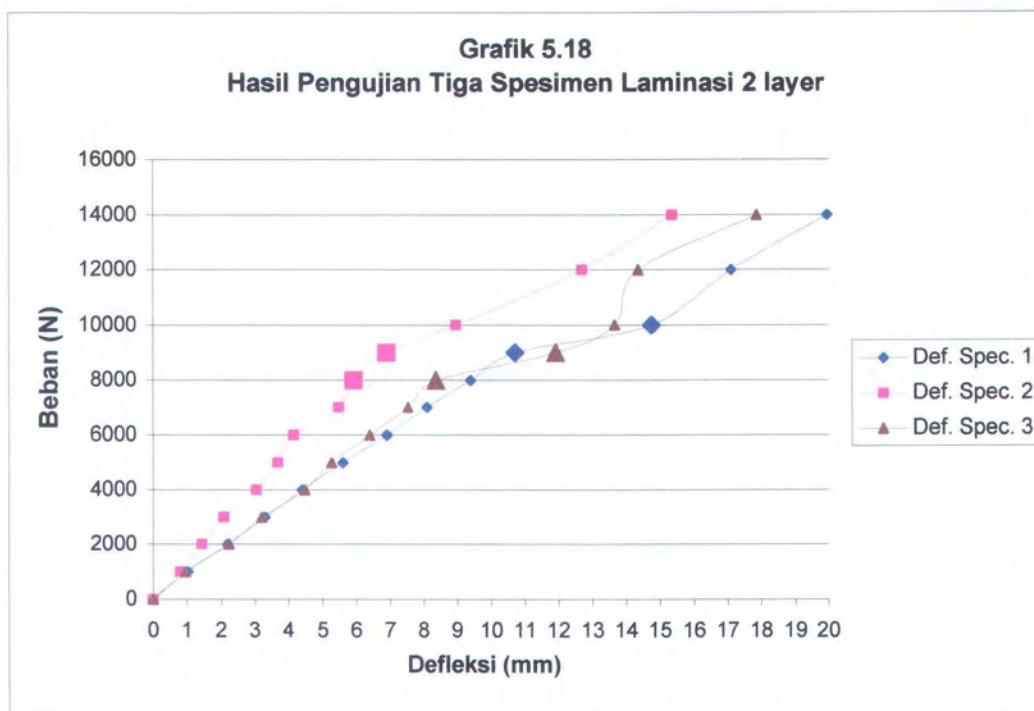
Gambar 5.10 Gambar Spesimen 1 kayu laminasi dua layer setelah pengujian



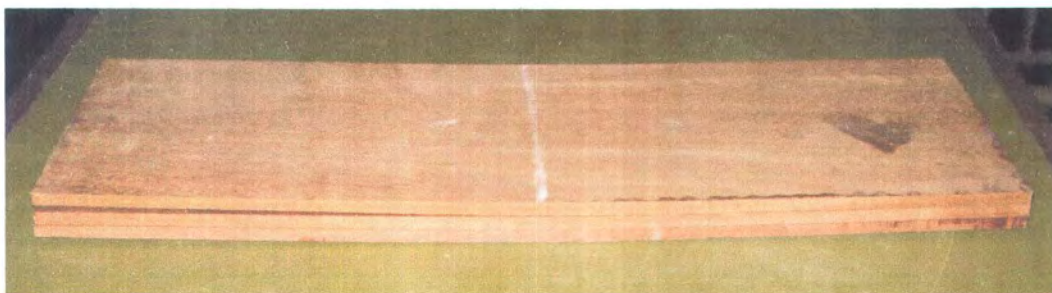
Gambar 5.11 Gambar Spesimen 2 kayu laminasi dua layer setelah pengujian



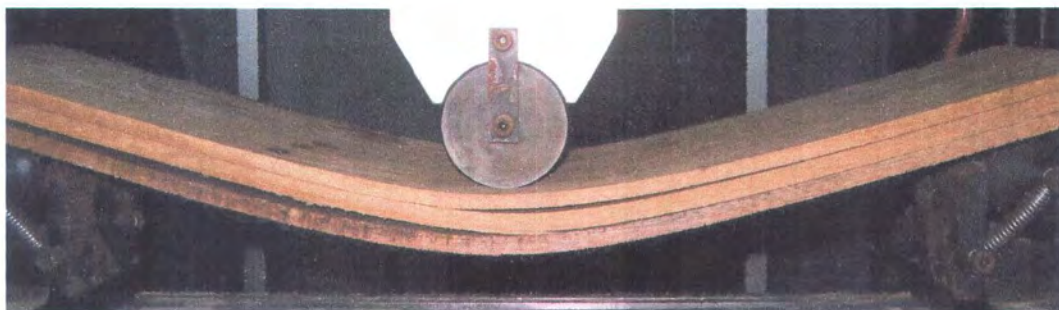
Gambar 5.12 Gambar Spesimen 3 kayu laminasi dua layer setelah pengujian



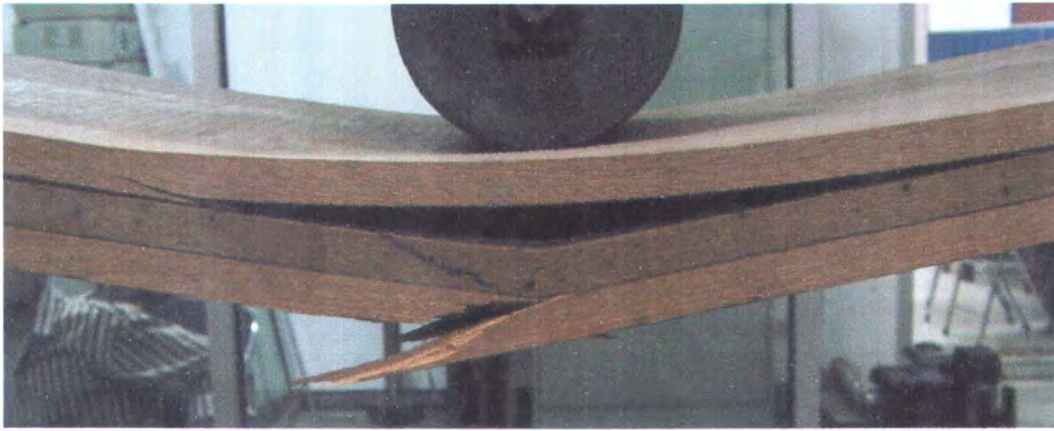
5.6.3 Kerusakan Awal Pada Material Kayu Laminasi Tiga Layer dan Hasil Defleksi Beban Tiap Spesimen Pengujian.



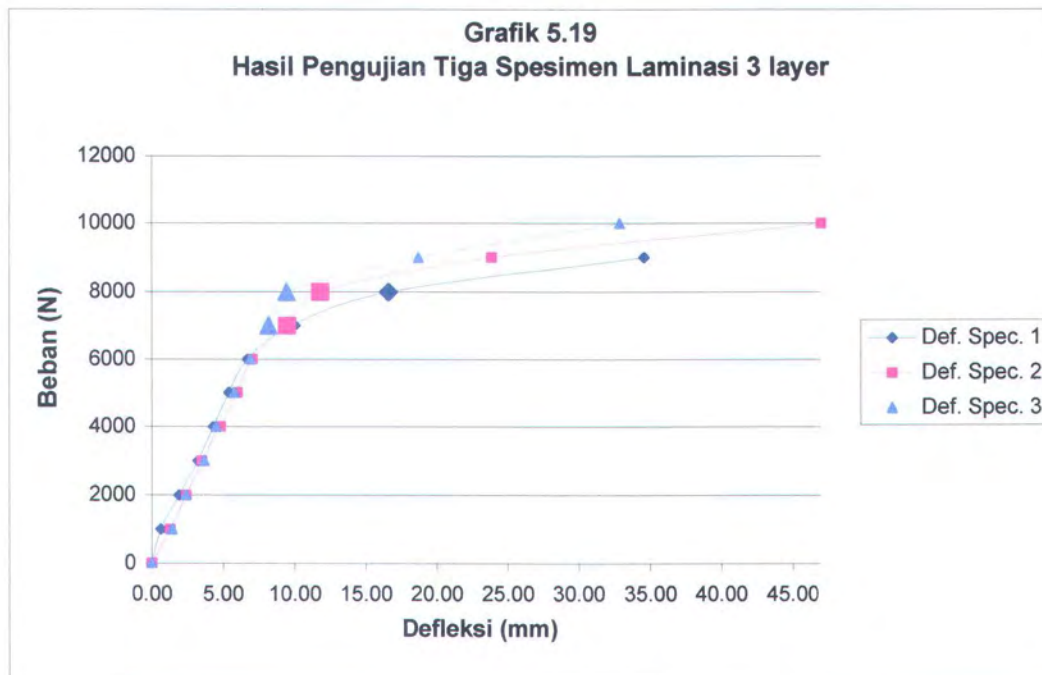
Gambar 5.13 Gambar Spesimen 1 kayu laminasi Tiga layer setelah pengujian



Gambar 5.14 Gambar Spesimen 2 kayu laminasi Tiga layer setelah pengujian



Gambar 5.15 Gambar Spesimen 3 kayu laminasi Tiga layer setelah pengujian



Dari gambar dan grafik diatas dapat dilihat bahwa distribusi defleksi untuk material kayu tunggal biasa mendekati sama. Perbedaan hanya terjadi pada spesimen pertama dimana dalam gambar diatas terlihat bahwa kerusakan yang terjadi menunjukkan arah serat yang sejajar atau tegak lurus dengan arah pembebanan sedangkan spesimen yang lain terdapat kemiringan arah serat yang menyebabkan kekuatan spesimen ini lebih besar daripada yang lain. Pada material



kayu laminasi dua layer perbedaan terbesar terjadi pada spesimen kedua seperti terlihat dalam gambar kerusakan awal spesimen kedua terjadi secara sempurna yaitu pada kayu sedangkan spesimen pertama dan ketiga kerusakan awal terjadi pada perekatan yang dilanjutkan oleh kerusakan kayu. Hal ini yang menyebabkan perbedaan besar kekuatan dan defleksi antara spesiemen kedua dengan spesimen pertama dan ketiga. Pada material kayu laminasi tiga layer karakteristik ini sama dengan karakteristik material kayu laminasi dua layer. Perbedaan terbesar pada material ketiga dan pertama dimana spesimen pertama memiliki kekuatan lebih rendah daripada material ketiga. Karakteristik ini juga disebabkan seperti pada gambar terlihat bahwa spesimen pertama mengalami kerusakan awal pada perekatan sedangkan spesimen ketiga kerusakan ini tidak terjadi akan tetapi langsung terjadi kerusakan kayu penyusun laminasi.

Dari uraian diatas dapat diambil kesimpulan bahwa kekuatan material kayu tunggal biasa tergantung dari sudut serat kayu. Pada material kayu laminasi kekuatan dalam menahan beban akan menurun apabila kerusakan awal terjadi pada daerah perekatan yang menyebabkan pergeseran atau slip antar lapisan penyusun laminasi. Kerusakan ini dapat diakibatkan perbedaan kekuatan antara kayu penyusun dengan daya rekat pengeleman yang besar. Kerusakan awal pada kayu terjadi jika lapisan kayu penyusun memiliki kekuatan yang lebih kecil daripada daya rekat pengeleman, sudut arah serat kayu penyusun yang mengurangi kekuatan kayu dan adanya mata kayu atau cacat pada material lapisan penyusun laminasi.



BAB VI**KESIMPULAN DAN SARAN****6.1. Kesimpulan**

Dari hasil analisa dan perhitungan pada bab V, bisa diambil beberapa kesimpulan mengenai sifat-sifat material komposit kayu laminasi adalah sebagai berikut :

1. Kemampuan material komposit kayu laminasi dalam menahan beban bending lebih kecil dari pada material kayu tunggal biasa. Untuk material dengan jenis bahan dan dimensi yang sama, material kayu laminasi tiga layer hanya mampu menahan beban sampai 10.000 N dan kayu laminasi dua layer mampu menahan beban 14.000 N sedangkan material kayu tunggal biasa dapat menahan beban sampai 20.000 N.
2. Dari sisi kelenturan (prosentase defleksi akibat beban terhadap panjang spesimen), material komposit kayu laminasi memiliki kelenturan yang lebih besar daripada material kayu tunggal biasa. Sifat kelenturan bahan ini akan bertambah dengan bertambahnya jumlah layer atau lapisan penyusun kayu laminasi. Hal ini ditunjukkan oleh hasil prosentase defleksi beban akibat beban bending pada kayu laminasi tiga layer untuk beban 10.000 N sebesar 6,65 % dan kayu laminasi dua layer sebesar 1,98 % sedangkan pada kayu tunggal biasa untuk beban yang sama prosentase defleksi beban hanya 1,16 % saja dari panjang spesimen.



3. Dari sisi sifat elastisitas (kemampuan material kembali ke bentuk semula apabila beban luar dihilangkan, yang ditunjukkan dengan prosentase defleksi sisa terhadap panjang spesimen). Material komposit kayu laminasi memiliki elastisitas yang lebih rendah dari material kayu tunggal biasa, dan sifat elastis ini akan semakin menurun dengan bertambahnya jumlah layer atau lapisan kayu laminasi. Hal ini dapat ditunjukkan oleh hasil prosentase defleksi sisa dengan panjang specimen pengujian. Pada material kayu laminasi tiga layer sebesar 0,858 % dan pada material kayu laminasi dua layer sebesar 0,397 % sedangkan pada material kayu tunggal biasa hanya 0,089 %.
4. Besarnya tegangan yang bekerja pada daerah perekatan atau pengeleman untuk material komposit kayu laminasi akan semakin besar dengan bertambahnya jumlah layer atau lapisan penyusun kayu laminasi. Sifat ini ditunjukkan pada hasil perhitungan dengan menggunakan program MSC/Nastran 4.5 pada beban maksimum untuk kayu laminasi tiga layer sebesar 10.000 N tegangan pada perekatan sebesar 4.528,632 KN/m²
5. Hasil dari perhitungan MSC Nastran dapat dilihat material komposit kayu laminasi dua layer, tegangan yang terjadi pada daerah perekatan atau pengeleman adalah terkecil yaitu sebesar 2.402,44 KN/m² sehingga untuk beban-beban bending pada konstruksi kayu laminasi dianjurkan dibuat dengan dua layer karena tegangan (σ) yang bekerja pada perekatan adalah yang terkecil sedangkan kekuatannya dalam menahan beban bending lebih besar daripada kayu laminasi dengan lebih dari dua layer.



6. Semakin banyak jumlah layer atau lapisan yang menyusun konstruksi kayu laminasi maka kekuatan material akan semakin menurun. Hal ini disebabkan semakin jauh letak perekatan terhadap netral aksis maka besarnya tegangan (σ) yang bekerja pada perekatan semakin besar.
7. Kerusakan awal yang terjadi pada daerah perekatan dapat mengurangi kekuatan material kayu laminasi. Kerusakan ini dapat terjadi akibat pengaruh serat kayu yang sejajar pengeleman sehingga kekuatan kayu lebih tinggi daripada daya rekat pengeleman. Pengaruh yang lain dapat disebabkan oleh sudut serat kayu penyusun laminasi dan adanya mata kayu atau cacat kayu.

6.2. Saran

1. Dalam penulisan tugas akhir ini, pada pembuatan material kayu laminasi tidak memperhatikan sifat-sifat mekanis kayu dan resin yang sangat dipengaruhi oleh kelembaban kayu tersebut ataupun kelembaban lingkungan saat proses pembuatan. Kelembaban ini sangat berpengaruh terhadap hasil pengeleman atau daya rekat pengeleman sehingga perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai sifat mekanis dari kayu akibat pengaruh kadar kelembaban terhadap hasil pengeleman.
2. Dalam penggunaan perekat, dipasaran terdapat berbagai jenis perekat atau resin yang dapat digunakan sebagai perekat untuk konstruksi kayu laminasi yang memungkinkan adanya perbedaan hasil yang lain terhadap sifat bending material kayu laminasi dari yang penulis dapatkan sehingga



perlu dilakukan penelitian untuk berbagai jenis resin atau perekat terhadap sifat material kayu laminasi yang dihasilkan.

3. Dalam penulisan tugas akhir ini, penulis tidak memperhatikan serat kayu yang berfungsi sebagai fiber atau serat dalam komposit kayu laminasi ini sehingga perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh sudut serat kayu terhadap sifat-sifat bending material kayu laminasi.



DAFTAR PUSTAKA

1. Arief, Mochamad. Y., "Analisis Kekuatan Tarik dan Kelenturan Komposit Lamina Kayu Lapis (Plywood) Terhadap Perubahan Orientasi sudut Serat dan Kadar Air", Surabaya : Program Studi D3 Teknik Mesin, FTI-ITS (1996)
2. Cahyono, Agus. H., "Studi Perbandingan Kekuatan Konstruksi Lambung Kapal Kayu Sistem Overlapping dan Sistem Pantek", Surabaya : Jurusan Teknik Perkapalan, FTK-ITS (2004)
3. Chapra, Steven C, "Numerical Methods For Engineers" McGraw Hill
4. D 638-84, "Standard Test Method For Tensile Properties Of Plastic", Philadelphia : Annual Book of ASTM Standard (1986)
5. D 350-90, "Standard Method of Testing Small Clear Specimen of Timber", Philadelphia : Annual Book of ASTM Standard (1994)
6. Gibson, Ronald. F, "Principles of Composite Material Mechanics", Michigan : McGraw-Hill International (1994)
7. Peraturan Konstruksi Kayu Indonesia (PKKI)
8. Popov, E.P., "Mekanika Teknik", Jakarta: Penerbit Erlangga (1995).
9. Steward, Robert. M, "Boatbuilding Manual 4th Edition", Camden : Internasional Marine (1994)
10. Suciawan, Agung. G., "Studi Perbandingan Kekuatan Pasak kayu dan Pasak Baja Pada Konstruksi Kapal Kayu Tradisional", Surabaya : Jurusan Teknik Perkapalan, FTK-ITS (2004)



11. Green, David W and Winandy, Jerrod E, “ Wood Handbook Chapter 4: Mechanical Properties of Wood”, Madison : Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory (1999)
12. Sunaryo, Hery , Sentot, Rahardjono, “Teknologi Bangunan Kapal Non Baja”, Jakarta : Departemen Pendidikan Nasional (2000)
13. Suwandono, Untung dan Widodo, Slamet, “Analisa Teknis Pembuatan Kapal Kayu Laminasi Pada Galangan Wiradat di Banyuwangi”, Surabaya : Jurusan Teknik Perkapalan, FTK-ITS (1994)
14. Sadjii, Ir. “Konstruksi Kayu”, Surabaya : Jurusan Teknik Sipil, FTI – ITS (1985)
15. Wiryomartono, Suwarno, “Konstruksi Kayu”, Yogyakarta : Universitas Gajah Mada (1977)
16. Yap, K.H Felix, “ Konstruksi Kayu”, Bandung : Binacipta (1991)



Chapter 4

Mechanical Properties of Wood

David W. Green, Jerrold E. Winandy, and David E. Kretschmann

Contents

Orthotropic Nature of Wood	4-1
Elastic Properties	4-2
Modulus of Elasticity	4-2
Poisson's Ratio	4-2
Modulus of Rigidity	4-3
Strength Properties	4-3
Common Properties	4-3
Less Common Properties	4-24
Damping Properties	4-25
Speed of Sound	4-25
Internal Friction	4-26
Mechanical Properties of Clear Straight-Grained Wood	4-26
Natural Characteristics Affecting Mechanical Properties	4-27
Specific Gravity	4-27
Knots	4-27
Slope of Grain	4-28
Annual Ring Orientation	4-30
Reaction Wood	4-31
Juvenile Wood	4-32
Compression Failures	4-33
Check Pockets	4-33
Bird Peck	4-33
Extractives	4-33
Properties of Timber From Dead Trees	4-33
Effects of Manufacturing and Service Environments	4-34
Moisture Content	4-34
Temperature	4-35
Time Under Load	4-37
Swelling	4-41
Exposure to Chemicals	4-41
Chemical Treatment	4-41
Nuclear Radiation	4-43
Mold and Stain Fungi	4-43
Decay	4-43
Insect Damage	4-43
References	4-44



The mechanical properties presented in this chapter were obtained from tests of small pieces of wood termed "clear" and "straight grained" because they did not contain characteristics such as knots, cross grain, checks, and splits. These test pieces did have anatomical characteristics such as growth rings that occurred in consistent patterns within each piece. Clear wood specimens are usually considered "homogeneous" in wood mechanics.

Many of the mechanical properties of wood tabulated in this chapter were derived from extensive sampling and analysis procedures. These properties are represented as the average mechanical properties of the species. Some properties, such as tension parallel to the grain, and all properties for some imported species are based on a more limited number of specimens that were not subjected to the same sampling and analysis procedures. The appropriateness of these latter properties to represent the average properties of a species is uncertain; nevertheless, the properties represent the best information available.

Variability, or variation in properties, is common to all materials. Because wood is a natural material and the tree is subject to many constantly changing influences (such as moisture, soil conditions, and growing space), wood properties vary considerably, even in clear material. This chapter provides information, where possible, on the nature and magnitude of variability in properties.

This chapter also includes a discussion of the effect of growth features, such as knots and slope of grain, on clear wood properties. The effects of manufacturing and service environments on mechanical properties are discussed, and their effects on clear wood and material containing growth features are compared. Chapter 6 discusses how these research results have been implemented in engineering standards.

Orthotropic Nature of Wood

Wood may be described as an orthotropic material; that is, it has unique and independent mechanical properties in the directions of three mutually perpendicular axes: longitudinal, radial, and tangential. The longitudinal axis L is parallel to the fiber (grain); the radial axis R is normal to the growth rings (perpendicular to the grain in the radial direction); and

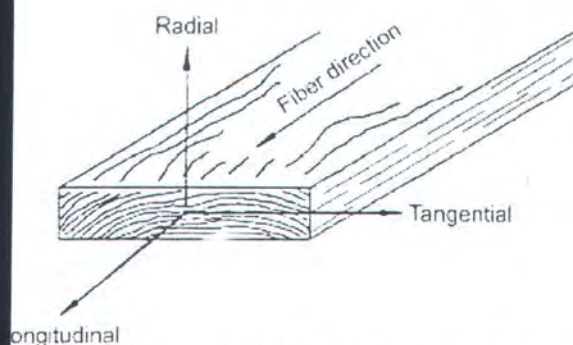


Figure 4-1. Three principal axes of wood with respect to grain direction and growth rings.

The tangential axis T is perpendicular to the grain but tangent to the growth rings. These axes are shown in Figure 4-1.

Elastic Properties

Twelve constants (nine are independent) are needed to describe

the elastic behavior of wood: three moduli of elasticity E , three moduli of rigidity G , and six Poisson's ratios μ . The moduli of elasticity and Poisson's ratios are related by expressions of the form

$$\frac{\mu_{ij}}{E_i} = \frac{\mu_{ji}}{E_j}, i \neq j, i, j = L, R, T \quad (4-1)$$

General relations between stress and strain for a homogeneous orthotropic material can be found in texts on anisotropic elasticity.

Modulus of Elasticity

Elasticity implies that deformations produced by low stress are completely recoverable after loads are removed. When loaded to higher stress levels, plastic deformation or failure occurs. The three moduli of elasticity, which are denoted by E_L , E_R , and E_T , respectively, are the elastic moduli along the longitudinal, radial, and tangential axes of wood. These moduli are usually obtained from compression tests; however, data for E_R and E_T are not extensive. Average values of E_R and E_T for samples from a few species are presented in Table 4-1 as ratios with E_L ; the Poisson's ratios are shown in Table 4-2. The elastic ratios, as well as the elastic constants themselves, vary within and between species and with moisture content and specific gravity.

The modulus of elasticity determined from bending, E_L , rather than from an axial test, may be the only modulus of elasticity available for a species. Average E_L values obtained from bending tests are given in Tables 4-3 to 4-5. Representative coefficients of variation of E_L determined with bending tests for clear wood are reported in Table 4-6. As tabulated, E_L includes an effect of shear deflection; E_L from bending can be increased by 10% to remove this effect approximately.

Table 4-1. Elastic ratios for various species at approximately 12% moisture content^a

Species	E_T/E_L	E_R/E_L	G_{LR}/E_L	G_{LT}/E_L	G_{RT}/E_L
Hardwoods					
Ash, white	0.080	0.125	0.109	0.077	—
Balsa	0.015	0.046	0.054	0.037	0.005
Basswood	0.027	0.066	0.056	0.046	—
Birch, yellow	0.050	0.078	0.074	0.068	0.017
Cherry, black	0.086	0.197	0.147	0.097	—
Cottonwood, eastern	0.047	0.083	0.076	0.052	—
Mahogany, African	0.050	0.111	0.088	0.059	0.021
Mahogany, Honduras	0.064	0.107	0.066	0.086	0.028
Maple, sugar	0.065	0.132	0.111	0.063	—
Maple, red	0.067	0.140	0.133	0.074	—
Oak, red	0.082	0.154	0.089	0.081	—
Oak, white	0.072	0.163	0.086	—	—
Shorea (baulau group)	0.036	0.198	0.136	0.149	0.112
Sweet gum	0.050	0.115	0.089	0.061	0.021
Walnut, black	0.056	0.106	0.085	0.062	0.021
Yellow-poplar	0.043	0.092	0.075	0.069	0.011
Softwoods					
Baldcypress	0.039	0.084	0.063	0.054	0.007
Cedar, northern white	0.081	0.183	0.210	0.187	0.015
Cedar, western red	0.055	0.081	0.087	0.086	0.005
Douglas-fir	0.050	0.068	0.064	0.078	0.007
Fir, subalpine	0.039	0.102	0.070	0.058	0.006
Hemlock, western	0.031	0.058	0.038	0.032	0.003
Larch, western	0.065	0.079	0.063	0.069	0.007
Pine					
Loblolly	0.078	0.113	0.082	0.081	0.013
Lodgepole	0.068	0.102	0.049	0.046	0.005
Longleaf	0.055	0.102	0.071	0.060	0.012
Pond	0.041	0.071	0.050	0.045	0.009
Ponderosa	0.083	0.122	0.138	0.115	0.017
Red	0.044	0.088	0.096	0.081	0.011
Slash	0.045	0.074	0.055	0.053	0.010
Sugar	0.087	0.131	0.124	0.113	0.019
Western white	0.038	0.078	0.052	0.048	0.005
Redwood	0.089	0.087	0.066	0.077	0.011
Spruce, Sitka	0.043	0.078	0.064	0.061	0.003
Spruce, Engelmann	0.059	0.128	0.124	0.120	0.010

^a E_L may be approximated by increasing modulus of elasticity values in Table 4-3 by 10%.

This adjusted bending E_L can be used to determine E_R and E_T based on the ratios in Table 4-1.

Poisson's Ratio

When a member is loaded axially, the deformation perpendicular to the direction of the load is proportional to the deformation parallel to the direction of the load. The ratio of the transverse to axial strain is called Poisson's ratio. The Poisson's ratios are denoted by μ_{LR} , μ_{RL} , μ_{LT} , μ_{TL} , μ_{RT} , and μ_{TR} . The first letter of the subscript refers to direction of applied stress and the second letter to direction of lateral deformation. For example, μ_{LR} is the Poisson's ratio for deformation along the radial axis caused by stress along the longitudinal axis. Average values of Poisson's ratios for samples of a few species are given in Table 4-2. Values for μ_{RL} and μ_{TL} are less precisely determined than are those for the other Poisson's ratios. Poisson's ratios vary within and between species and are affected by moisture content and specific gravity.

le 4-2. Poisson's ratios for various species at roximately 12% moisture content

ies	μ_{LR}	μ_{LT}	μ_{RT}	μ_{TR}	μ_{RL}	μ_{TL}
Hardwoods						
white	0.371	0.440	0.684	0.360	0.059	0.051
en, quaking	0.489	0.374	—	0.496	0.054	0.022
a	0.229	0.438	0.665	0.231	0.018	0.009
swood	0.364	0.406	0.912	0.346	0.034	0.022
n, yellow	0.426	0.451	0.697	0.426	0.043	0.024
rry, black	0.392	0.428	0.695	0.282	0.086	0.048
onwood, eastern	0.344	0.420	0.875	0.292	0.043	0.018
ogany, African	0.297	0.641	0.604	0.264	0.033	0.032
ogany, Honduras	0.314	0.533	0.600	0.326	0.033	0.034
le, sugar	0.424	0.476	0.774	0.349	0.065	0.037
le, red	0.434	0.509	0.762	0.354	0.063	0.044
, red	0.350	0.448	0.560	0.292	0.064	0.033
, white	0.369	0.428	0.618	0.300	0.074	0.036
rea(baulau group)	0.488	0.427	0.784	0.324	0.078	0.042
et gum	0.325	0.403	0.682	0.309	0.044	0.023
nut, black	0.495	0.632	0.718	0.378	0.052	0.035
ow-poplar	0.318	0.392	0.703	0.329	0.030	0.019
Softwoods						
cypress	0.338	0.326	0.411	0.356	—	—
ar, northern white	0.337	0.340	0.458	0.345	—	—
ar, western red	0.378	0.296	0.484	0.403	—	—
glas-fir	0.292	0.449	0.390	0.374	0.036	0.029
subalpine	0.341	0.332	0.437	0.336	—	—
lock, western	0.485	0.423	0.442	0.382	—	—
h, western	0.355	0.276	0.389	0.352	—	—
olly	0.328	0.292	0.382	0.362	—	—
gepole	0.316	0.347	0.469	0.381	—	—
leaf	0.332	0.365	0.384	0.342	—	—
d	0.280	0.364	0.389	0.320	—	—
derosa	0.337	0.400	0.426	0.359	—	—
	0.347	0.315	0.408	0.308	—	—
h	0.392	0.444	0.447	0.387	—	—
ar	0.356	0.349	0.428	0.358	—	—
stern white	0.329	0.344	0.410	0.334	—	—
wood	0.360	0.346	0.373	0.400	—	—
ice, Sitka	0.372	0.467	0.435	0.245	0.040	0.025
ice, Engelmann	0.422	0.462	0.530	0.255	0.083	0.058

made to evaluate work to maximum load in bending, impact bending strength, tensile strength perpendicular to grain, and hardness. These properties, grouped according to the broad forest tree categories of hardwood and softwood (not correlated with hardness or softness), are given in Tables 4-3 to 4-5 for many of the commercially important species. Average coefficients of variation for these properties from a limited sampling of specimens are reported in Table 4-6.

Modulus of rupture—Reflects the maximum load-carrying capacity of a member in bending and is proportional to maximum moment borne by the specimen. Modulus of rupture is an accepted criterion of strength, although it is not a true stress because the formula by which it is computed is valid only to the elastic limit.

Work to maximum load in bending—Ability to absorb shock with some permanent deformation and more or less injury to a specimen. Work to maximum load is a measure of the combined strength and toughness of wood under bending stresses.

Compressive strength parallel to grain—Maximum stress sustained by a compression parallel-to-grain specimen having a ratio of length to least dimension of less than 11.

Compressive stress perpendicular to grain—Reported as stress at proportional limit. There is no clearly defined ultimate stress for this property.

Shear strength parallel to grain—Ability to resist internal slipping of one part upon another along the grain. Values presented are average strength in radial and tangential shear planes.

Impact bending—In the impact bending test, a hammer of given weight is dropped upon a beam from successively increased heights until rupture occurs or the beam deflects 152 mm (6 in.) or more. The height of the maximum drop, or the drop that causes failure, is a comparative value that represents the ability of wood to absorb shocks that cause stresses beyond the proportional limit.

Tensile strength perpendicular to grain—Resistance of wood to forces acting across the grain that tend to split a member. Values presented are the average of radial and tangential observations.

Hardness—Generally defined as resistance to indentation using a modified Janka hardness test, measured by the load required to embed a 11.28-mm (0.444-in.) ball to one-half its diameter. Values presented are the average of radial and tangential penetrations.

Tensile strength parallel to grain—Maximum tensile stress sustained in direction parallel to grain. Relatively few data are available on the tensile strength of various species of clear wood parallel to grain. Table 4-7 lists average tensile strength values for a limited number of specimens of a few species. In the absence of sufficient tension test data, modulus of rupture values are sometimes substituted for tensile strength of small, clear, straight-grained pieces of wood. The modulus of rupture is considered to be a low or conservative estimate of tensile strength for clear specimens (this is not true for lumber).

Modulus of Rigidity

modulus of rigidity, also called shear modulus, indicates the resistance to deflection of a member caused by shear stresses. The three moduli of rigidity denoted by G_{LR} , G_{LT} , G_{RT} are the elastic constants in the LR, LT, and RT planes, respectively. For example, G_{LR} is the modulus of rigidity based on shear strain in the LR plane and shear stresses in the LT and RT planes. Average values of shear moduli for samples of a few species expressed as ratios with modulus of elasticity are given in Table 4-1. As with moduli of elasticity, the moduli of rigidity vary within and between species and with moisture content and specific gravity.

Strength Properties Common Properties

Mechanical properties most commonly measured and represented as "strength properties" for design include modulus of rupture in bending, maximum stress in compression parallel to grain, compressive stress perpendicular to grain, and shear strength parallel to grain. Additional measurements are often

Table 4-5a. Mechanical properties of some woods imported into the United States other than Canadian imports (metric)^a

Common and botanical names of species	Moisture content	Specific gravity	Static bending			Compression parallel to grain (kPa)	Shear parallel to grain (kPa)	Side hardness (N)	Sample origin ^b
			Modulus of rupture (kPa)	Modulus of elasticity (MPa)	Work to maximum load (kJ/m ³)				
Afromosia (<i>Pericopsis elata</i>)	Green	0.61	102,000	12,200	135	51,600	11,500	7,100	AF
	12%		126,900	13,400	127	68,500	14,400	6,900	
Albarco (<i>Cariniana</i> spp.)	Green	0.48	—	—	—	—	—	—	AM
	12%		100,000	10,300	95	47,000	15,900	4,500	
Andiroba (<i>Carapa guianensis</i>)	Green	0.54	71,000	11,700	68	33,000	8,400	3,900	AM
	12%	—	106,900	13,800	97	56,000	10,400	5,000	
Angelin (<i>Andira inermis</i>)	Green	0.65	—	—	—	—	—	—	AF
	12%		124,100	17,200	—	63,400	12,700	7,800	
Angeliue (<i>Dicorynia guianensis</i>)	Green	0.6	78,600	12,700	83	38,500	9,200	4,900	AM
	12%	—	120,000	15,100	105	60,500	11,400	5,700	
Avodire (<i>Turraeanthus africanus</i>)	Green	0.48	—	—	—	—	—	—	AF
	12%		87,600	10,300	65	49,300	14,000	4,800	
Azobe (<i>Lophira alata</i>)	Green	0.87	116,500	14,900	83	65,600	14,100	12,900	AF
	12%		168,900	17,000	—	86,900	20,400	14,900	
Balsa (<i>Ochroma pyramidale</i>)	Green	0.16	—	—	—	—	—	—	AM
	12%		21,600	3,400	14	14,900	2,100	—	
Banak (<i>Virola</i> spp.)	Green	0.42	38,600	11,300	28	16,500	5,000	1,400	AM
	12%	—	75,200	14,100	69	35,400	6,800	2,300	
Benge (<i>Guibourtia arnoldiana</i>)	Green	0.65	—	—	—	—	—	—	AF
	12%		147,500	14,100	—	78,600	14,400	7,800	
Bubinga (<i>Guibourtia</i> spp.)	Green	0.71	—	—	—	—	—	—	AF
	12%		155,800	17,100	—	72,400	21,400	12,000	
Bulletwood (<i>Manilkara bidentata</i>)	Green	0.85	119,300	18,600	94	59,900	13,100	9,900	AM
	12%		188,200	23,800	197	80,300	17,200	14,200	
Cativo (<i>Prioria copaifera</i>)	Green	0.4	40,700	6,500	37	17,000	5,900	2,000	AM
	12%	—	59,300	7,700	50	29,600	7,300	2,800	
Ceiba (<i>Ceiba pentandra</i>)	Green	0.25	15,200	2,800	8	7,300	2,400	1,000	AM
	12%		29,600	3,700	19	16,400	3,800	1,100	
Courbaril (<i>Hymenaea courbaril</i>)	Green	0.71	88,900	12,700	101	40,000	12,200	8,800	AM
	12%	—	133,800	14,900	121	65,600	17,000	10,500	
Cuangare (<i>Dialyanthera</i> spp.)	Green	0.31	27,600	7,000	—	14,300	4,100	1,000	AM
	12%		50,300	10,500	—	32,800	5,700	1,700	
Cypress, Mexican (<i>Cupressus lustianica</i>)	Green	0.93	42,700	6,300	—	19,900	6,600	1,500	AF
	12%		71,000	7,000	—	37,100	10,900	2,000	
Degame (<i>Calycophyllum candidissimum</i>)	Green	0.67	98,600	13,300	128	42,700	11,400	7,300	AM
	12%		153,800	15,700	186	66,700	14,600	8,600	
Determa (<i>Ocotea rubra</i>)	Green	0.52	53,800	10,100	33	25,900	5,900	2,300	AM
	12%		72,400	12,500	44	40,000	6,800	2,900	
Ekop (<i>Tetraberlinia tubmaniana</i>)	Green	0.6	—	—	—	—	—	—	AF
	12%		115,100	15,200	—	62,100	—	—	
Goncalo alves (<i>Astronium graveolens</i>)	Green	0.84	83,400	13,400	46	45,400	12,100	8,500	AM
	12%	—	114,500	15,400	72	71,200	13,500	9,600	
Greenheart (<i>Chlorocardium rodiei</i>)	Green	0.8	133,100	17,000	72	64,700	13,300	8,400	AM
	12%		171,700	22,400	175	86,300	18,100	10,500	
Hura (<i>Hura crepitans</i>)	Green	0.38	43,400	7,200	41	19,200	5,700	2,000	AM
	12%		60,000	8,100	46	33,100	7,400	2,400	



Table 4-5a. Mechanical properties of some woods imported into the United States other than Canadian
ports (metric)^a—con.

Common and botanical names of species	Moisture content	Specific gravity	Static bending			Com- pression parallel to grain (kPa)	Shear parallel to grain (kPa)	Side hard- ness (N)	Sample origin ^b
			Modulus of rupture (kPa)	Modulus of elasticity (MPa)	Work to maximum load (kJ/m ³)				
ba (<i>Pycnanthus</i> <i>ngolensis</i>)	Green	0.4	37,900	7,900	—	20,000	5,800	2,100	AF
	12%		68,300	11,000	—	38,300	8,900	2,700	
(<i>Tabebuia</i> spp., pacho group)	Green	0.92	155,800	20,100	190	71,400	14,600	13,600	AM
	12%		175,100	21,600	152	89,700	14,200	15,400	
b (<i>Chlorophora</i> spp.)	Green	0.54	70,300	8,900	72	33,900	9,000	4,800	AF
	12%		85,500	10,100	62	52,300	12,400	5,600	
ah (<i>Eucalyptus marginata</i>)	Green	0.67	68,300	10,200	—	35,800	9,100	5,700	AS
	12%	—	111,700	13,000	—	61,200	14,700	8,500	
tong (<i>Dyera costulata</i>)	Green	0.36	38,600	8,000	39	21,000	5,200	1,500	AS
	15%		50,300	8,100	44	27,000	5,800	1,700	
eelhart (<i>Licaria</i> spp.)	Green	0.96	153,800	26,300	94	92,300	11,600	9,800	AM
	12%		206,200	28,000	121	120,000	13,600	12,900	
ur (<i>Dryobalanops</i> spp.)	Green	0.64	88,300	11,000	108	42,900	8,100	4,400	AS
	12%		126,200	13,000	130	69,600	13,700	5,500	
i (<i>Eucalyptus diversicolor</i>)	Green	0.82	77,200	13,400	80	37,600	10,400	6,000	AS
	12%		139,000	17,900	175	74,500	16,700	9,100	
mpas (<i>Koompassia</i> <i>alaccensis</i>)	Green	0.71	100,000	16,600	84	54,700	10,100	6,600	AS
	12%		122,000	18,500	106	65,600	12,300	7,600	
uing (<i>Dipterocarpus</i> spp.)	Green	0.69	82,000	11,800	96	39,200	8,100	4,700	AS
	12%		137,200	14,300	162	72,400	14,300	5,600	
umvitae (<i>Guaiaicum</i> spp.)	Green	1.05	—	—	—	—	—	—	AM
	12%	—	—	—	—	78,600	—	20,000	
ba (<i>Terminalia superba</i>)	Green	0.38	41,400	5,300	53	19,200	600	1,800	AF
	12%		60,700	7,000	61	32,600	9,700	2,200	
awood (<i>Platymiscium</i> spp.)	Green	0.94	153,800	20,800	—	72,700	12,700	14,800	AM
	12%		190,300	22,100	—	111,000	17,500	14,000	
ogany, African (<i>haya</i> spp.)	Green	0.42	51,000	7,900	49	25,700	6,400	2,800	AF
	12%		73,800	9,700	57	44,500	10,300	3,700	
ogany, true (<i>tetenia macrophylla</i>)	Green	0.45	62,100	9,200	63	29,900	8,500	3,300	AM
	12%	—	79,300	10,300	52	46,700	8,500	3,600	
abarklak (<i>Eschweilera</i> spp.)	Green	0.87	117,900	18,600	120	50,600	11,200	10,100	AM
	12%		182,700	21,600	230	77,300	14,300	15,500	
nni (<i>Symphonia globulifera</i>)	Green	0.58	77,200	13,500	77	35,600	7,900	4,200	AM
	12%		116,500	17,000	114	60,800	9,800	5,000	
ishballi (<i>Lincania</i> spp.)	Green	0.88	117,900	20,200	92	52,300	11,200	10,000	AM
	12%		191,000	23,000	98	92,300	12,100	15,900	
bau (<i>Intsia</i> spp.)	Green	0.64	88,900	13,900	88	46,700	10,800	6,100	AS
	15%	—	115,800	15,400	102	58,200	12,500	6,700	
sawa (<i>Anisoptera</i> spp.)	Green	0.52	55,200	12,200	—	27,300	5,100	3,900	AS
	12%		95,100	15,700	—	50,800	6,100	5,700	
a (<i>Mora</i> spp.)	Green	0.78	86,900	16,100	93	44,100	9,700	6,400	AM
	12%		152,400	20,400	128	81,600	13,100	10,200	
k (<i>Quercus</i> spp.)	Green	0.76	—	—	—	—	—	—	AM
	12%		158,600	20,800	114	—	—	11,100	
eche (<i>Triplochiton</i> <i>cleroxylon</i>)	Green	0.3	35,200	5,000	43	17,700	4,600	1,900	AF
	12%		51,000	5,900	48	27,100	6,800	1,900	

Table 4-5a. Mechanical properties of some woods imported into the United States other than Canadian
ports (metric)^a—con.

Common and botanical names of species	Moisture content	Specific gravity	Static bending			Com- pression parallel to grain (kPa)	Shear parallel to grain (kPa)	Side hard- ness (N)	Sample origin ^b
			Modulus of rupture (kPa)	Modulus of elasticity (MPa)	Work to maximum load (kJ/m ³)				
Acoumea (<i>Aucoumea</i> <i>klaineana</i>)	Green 12%	0.33	— 51,000	— 7,900	— —	— 27,400	— 6,700	— 1,700	AF
Alseia (<i>Nauclea diderrichii</i>)	Green 12%	0.63	93,800 120,000	11,900 13,400	84 99	51,600 71,700	13,100 17,100	6,800 7,300	AF
Alseia (<i>Gribourtia ehie</i>)	Green 12%	0.67	— 116,500	— 17,700	— —	— 57,200	— —	— —	AF
Alseia (<i>Hymenolobium</i> <i>excelsum</i>)	Green 12%	0.63	100,700 121,300	13,400 14,100	88 110	51,400 62,000	11,000 13,900	7,700 7,700	AM
Alseia (<i>Araucaria</i> <i>augustifolia</i>)	Green 12%	0.46	49,600 93,100	9,300 11,100	67 84	27,600 52,800	6,700 11,900	2,500 3,500	AM
Alseia (<i>Balfourodendron</i> <i>riedelianum</i>)	Green 15%	0.73	99,300 130,300	11,400 —	— —	41,900 56,500	— —	— —	AM
Alseia (<i>Paratecoma peroba</i>)	Green 12%	0.62	— 106,200	— 12,200	— 70	— 61,200	— 14,700	— 7,100	AM
Alseia (<i>Aspidosperma</i> spp., peroba group)	Green 12%	0.66	75,200 83,400	8,900 10,500	72 63	38,200 54,600	13,000 17,200	7,000 7,700	AM
Alseia (<i>Hyeronima</i> spp.)	Green 12%	0.65	73,800 125,500	13,000 15,700	57 83	34,200 66,300	8,300 11,900	5,400 7,600	AM
Alseia, Caribbean (<i>Pinus</i> <i>ribaea</i>)	Green 12%	0.68	77,200 115,100	13,000 15,400	74 119	33,800 58,900	8,100 14,400	4,400 5,500	AM
Alseia, ocote (<i>Pinus oocarpa</i>)	Green 12%	0.55	55,200 102,700	12,000 15,500	48 75	25,400 53,000	7,200 11,900	2,600 4,000	AM
Alseia, radiata (<i>Pinus radiata</i>)	Green 12%	0.42	42,100 80,700	8,100 10,200	— —	19,200 41,900	5,200 11,000	2,100 3,300	AS
Alseia (<i>Caryocar</i> spp.)	Green 12%	0.72	85,500 117,200	12,500 14,900	58 109	43,400 58,000	11,300 13,700	7,700 7,700	AM
Alseia (<i>Tabebuia</i> <i>donnell-smithii</i>)	Green 12%	0.4	49,600 65,500	6,800 7,200	50 44	24,200 38,600	7,100 9,600	3,100 2,900	AM
Alseia (<i>Peltogyne</i> spp.)	Green 12%	0.67	9,400 132,400	13,800 15,700	102 121	48,400 71,200	11,300 15,300	8,100 8,300	AM
Alseia (<i>Gonystylus bancanus</i>)	Green 12%	0.52	67,600 127,600	10,800 15,000	62 117	37,200 69,500	6,800 10,500	2,800 5,800	AS
Alseia (<i>Tabebuia</i> spp., roble group)	Green 12%	0.52	74,500 95,100	10,000 11,000	81 86	33,900 50,600	8,600 10,000	4,000 4,300	AM
Alseia, Brazilian (<i>Dalbergia nigra</i>)	Green 12%	0.8	97,200 131,000	12,700 13,000	91 —	38,000 66,200	16,300 14,500	10,900 12,100	AM
Alseia, Indian (<i>Dalbergia</i> <i>latifolia</i>)	Green 12%	0.75	63,400 116,500	8,200 12,300	80 90	31,200 63,600	9,700 14,400	6,900 14,100	AS
Alseia (<i>Brosimum</i> spp., utile group)	Green 12%	0.49	58,600 98,600	13,400 16,500	— —	31,000 56,700	7,200 8,900	2,700 4,000	AM
Alseia, Santa Maria (<i>Calophyllum</i> <i>brasiliense</i>)	Green 12%	0.52	72,400 100,700	11,000 12,600	88 111	31,400 47,600	8,700 14,300	4,000 5,100	AM
Alseia (<i>Entandrophragma</i> <i>cylindricum</i>)	Green 12%	0.55	70,300 105,500	10,300 12,500	72 108	34,500 56,300	8,600 15,600	4,500 6,700	AF
Alseia (<i>Pseudosindora</i> <i>palustris</i>)	Green 12%	0.56	77,200 118,600	10,800 13,600	92 92	37,600 61,200	9,000 14,000	4,200 6,300	AS

Table 4-5a. Mechanical properties of some woods imported into the United States other than Canadian woods (metric)^a—con.

Common and botanical names of species	Moisture content	Specific gravity	Static bending			Compression parallel to grain (kPa)	Shear parallel to grain (kPa)	Side hardness (N)	Sample origin ^b
			Modulus of rupture (kPa)	Modulus of elasticity (MPa)	Work to maximum load (kJ/m ³)				
Shorea (Shorea spp., lauan group)	Green	0.68	80,700	14,500	—	37,100	9,900	6,000	AS
	12%		129,600	18,000	—	70,200	15,100	7,900	
Shorea, lauan-meranti group	Green	0.46	64,800	10,300	59	32,500	7,700	3,100	AS
	12%		87,600	12,200	95	50,700	10,000	3,500	
Light red meranti	Green	0.34	45,500	7,200	43	23,000	4,900	2,000	AS
	12%		65,500	8,500	59	40,800	6,700	2,000	
White meranti	Green	0.55	67,600	9,000	57	37,900	9,100	4,400	AS
	15%		85,500	10,300	79	43,800	10,600	5,100	
Yellow meranti	Green	0.46	55,200	9,000	50	26,800	7,100	3,300	AS
	12%		78,600	10,700	70	40,700	10,500	3,400	
Japanese cedar (Cedrela spp.)	Green	0.41	51,700	9,000	49	23,200	6,800	2,400	AM
	12%	—	79,300	9,900	65	42,800	7,600	2,700	
Bowditchia (Bowditchia spp.)	Green	0.74	118,600	15,700	—	67,100	—	—	AM
	15%		133,800	—	—	76,500	—	—	
Bowditchia (Diptotropis purpurea)	Green	0.78	120,000	18,500	90	55,300	12,400	8,800	AM
	12%		142,000	19,800	102	83,700	13,500	9,500	
Teak (Tectona grandis)	Green	0.55	80,000	9,400	92	41,100	8,900	4,100	AS
	12%		100,700	10,700	83	58,000	13,000	4,400	
Cedrelinga (Cedrelinga cateniformis)	Green	0.45	57,900	—	—	28,300	8,100	3,900	AM
	12%	—	—	—	—	—	—	—	
Eperua (Eperua spp.)	Green	0.78	98,600	16,100	—	55,400	—	6,900	AM
	12%	—	131,700	15,700	—	74,200	—	9,100	

Results of tests on small, clear, straight-grained specimens. Property values were taken from world literature (not obtained from experiments conducted at the Forest Products Laboratory). Other species may be reported in the world literature, as well as additional data on many of these species. Some property values have been adjusted to 12% moisture content.

^a F is Africa; AM, America; AS, Asia.

TABLE 3.2
MATRIK PROPERTIES*

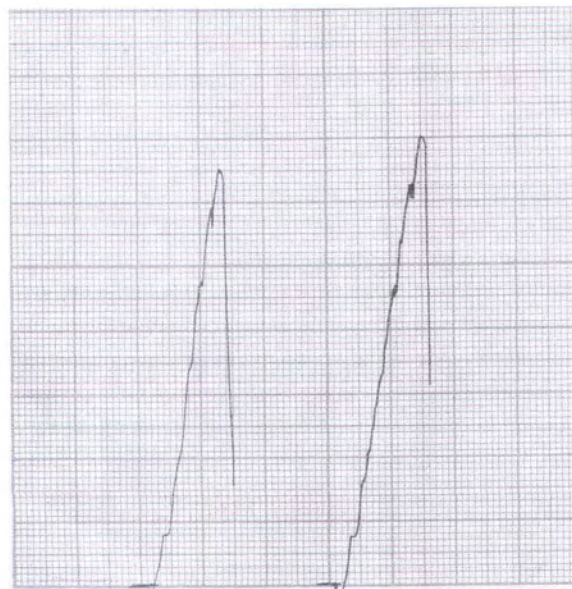
Name	Units	LM	IMLS	IMHS	HM	Polyimide	PMR
Density	lb/in ³	0.042	0.046	0.044	0.045	0.044	0.044
Modulus	10 ⁶ psi	0.32	0.50	0.50	0.75	0.50	0.47
Shear modulus	10 ⁶ psi	-	-	-	-	-	-
Poisson ratio	-	0.43	0.41	0.35	0.35	0.35	0.36
Heat capacity	Btu/lb/°F	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Heat conductivity	Btu/h/ft ² /°F/in	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
Thermal expansion coefficient	10 ⁻⁶ in/in/°F	57	57	36	40	20	28
Diffusivity	10 ⁻¹⁰ in ² /s	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Moisture expansion coefficient	in/in/M	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
Tensile strength	ksi	8	7	15	20	15	8
Compression strength	ksi	15	21	35	50	30	16.8
Shear strength	ksi	8	7	13	15	13	2.0
Tensile fracture strain	in/in (%)	8.1	1.4	2.0	2.0	2.0	3.5
Compressive fracture strain	in/in (%)	15	4.2	5.0	5.0	4.0	5.0
Shear fracture strain	in/in (%)	10	3.2	3.5	4.0	3.5	0.225
Air heat conductivity	Btu/h/ft ² /°F/in	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	700
Glas transition temperature (dry)	°F	350	420	420	420	700	

* = epoxy

LM = low modulus; IMLS = intermediate modulus low strength; IMHS = intermediate modulus high strength; HM = High modulus. Thermal, hygral, compression, and shear properties are estimates only; $G_m = E_m/2(1 + \nu_m)$

Source: From Chamis (3.14).





Grafik Load-strain pada pengujian tarik kayu

	Spec. 1	Spec. 2
Diameter (mm)	17.15	17.20
L (mm)	78.30	77.60
Luas (mm ²)	230.88	232.23
Pult (KN)	6.40	6.95
Pyield (KN)	5.80	6.20
Teg.ult (N/mm ²)	27.72	29.92
Teg.yield (N/mm ²)	25.12	26.69
L1 (mm)	50.65	77.95
Gauge (Lo) (mm)	50.00	77.00
e (%)	1.30	1.23
E = (σ/ε) (N/mm ²)	2132.308	2432.520
E (Mpa)	2.132	2.433

Dari hasil perhitungan diatas dapat dicari nilai modulus elastisitas rata-rata dari

kedua spesimen yaitu $\frac{2,132 + 2,433}{2} = 2,283$ Mpa. Untuk modulus geser dengan

menggunakan persamaan $G_m = E / 2(1+\nu) = \frac{2,283}{2(1+0.43)} = 798,08$ Mpa.

Hasil modulus elastisitas dari pengujian resin ini mendekati nilai modulus yang terdapat dalam literature (Lampiran table 3.2)



Input Material Property Untuk Kayu

Define 2D Orthotropic Material

ID	Title Kayu	Color 55	Palette...	Layer 1	Type...
Stiffness (E)					
1	1.8E+10	Shear (G)		Poisson Ratio(nu)	
2	3.57E+9	12 3.36E+9	12 0.488	Limit Stress/Strain	
		1z 2.69E+9	<input checked="" type="radio"/> Stress Limits		<input type="radio"/> Strain Limits
		2z 2.01E+9	Dir 1		Dir 2
		Tension		0.	0.
		Compression		0.	0.
		Shear		0.	
Expansion (A)					
1	0.	Conductivity (k)		Specific Heat, Cp	
2	0.	0.	0.	0.	
		0.	0.	Mass Density	
		0.	0.	0.	
		symmetric	0.	Damping, 2C/Co	
				0.	
				Reference Temp	
				0.	
				Tsai-Wu Interaction	
				0.	

Functions >>

Phase >> Nonlinear >> Load... Save... Copy... OK Cancel

Input Material Property Untuk Resin

Define Isotropic Material

ID	Title Resin	Color 55	Palette...	Layer 1	Type...
Stiffness					
Youngs Modulus, E		2.21E+9	Limit Stress		Mass Density
Shear Modulus, G		760689655.	Tension		0.
Poisson's Ratio, nu		0.43	Compression		0.
			Shear		0.
					Reference Temp
					0.
Thermal					
Expansion Coeff, a		0.	Functions >>		Load...
Conductivity, k		0.	Nonlinear >>		Save...
Specific Heat, Cp		0.	Phase Change >>		Copy...
Heat Generation Factor		0.			OK
					Cancel

**Hasil Running MSC NASTRAN Untuk Kayu Tunggal Biasa****Beban 1.000 N**

Select PostProcessing Data

View 1 Default XY View

Data Selection

Category 0..Any Output

Type 0..Value or Magnitude

☐ Data at Corners

Section Cut Options

☐ Cut Moment

☐ Contour Section

Numbers Spacing

Output Set

	Program	Analysis Type	Set Value
5..MSC/NASTRAN Case 1	MSC.Nastran	Static	0.

Output Vectors

	Type	ID	Value
Deformation			
1..Total Translation	Node	Maximum 777	7.54884E-4
		Minimum 612	0.
Contour			
7033..Plate Top VonMises Stress	Element	Maximum 784	4926480.
		Minimum 1041	1588.501

Final Output Set

Output Set Increment

Trace Locations...

Contour Options...

Contour Vectors...

Freebody Display...

OK

Cancel

Beban 2.000 N

Output Vectors				
Deformation	Type	ID	Value	
1..Total Translation	Node	Maximum 777	0.00150977	
		Minimum 612	0.	
Contour				
7033..Plate Top VonMises Stress	Element	Maximum 784	9852959.	
		Minimum 1041	3177.203	



Beban 3.000 N

Output Vectors				
Deformation	Type	ID	Value	
1..Total Translation	Node	Maximum 777	0.00226465	
		Minimum 612	0.	
Contour				
7033..Plate Top VonMises Stress	Element	Maximum 784	14779437.	
		Minimum 1041	4765.786	



**Beban 4.000 N**

Output Vectors					
		Type	ID	Value	
Deformation					
1..Total Translation	▼	Node	Maximum	777	0.00301953
			Minimum	612	0.
Contour					
7033..Plate Top VonMises Stress	▼	Element	Maximum	784	19705918.
			Minimum	1041	6354.405



Beban 5.000 N

Output Vectors		Type	ID	Value
Deformation				
1..Total Translation		Node	Maximum 777	0.00377442
			Minimum 612	0.
Contour				
7033..Plate Top VonMises Stress		Element	Maximum 784	24632398.
			Minimum 1041	7943.016

Beban 6.000 N

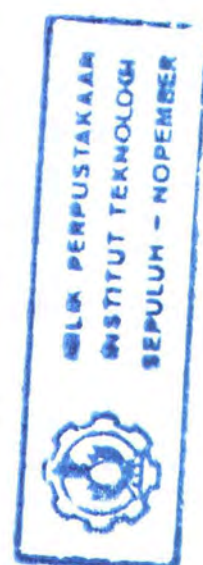
Output Vectors					
		Type	ID	Value	
Deformation					
1..Total Translation		Node	Maximum	777	0.0045293
			Minimum	612	0.
Contour					
7033..Plate Top VonMises Stress		Element	Maximum	784	29558874.
			Minimum	1041	9531.572

Beban 7.000 N

Output Vectors				Type	ID	Value
Deformation						
1..Total Translation		Node	Maximum	777	0.00528419	
			Minimum	612	0.	
Contour						
7033..Plate Top VonMises Stress		Element	Maximum	784	34485352.	
			Minimum	1041	11120.19	

Beban 8.000 N

Output Vectors					
Deformation		Type	ID	Value	
1..Total Translation	▼	Node	Maximum	777	0.00603907
			Minimum	612	0.
Contour					
7033..Plate Top VonMises Stress	▼	Element	Maximum	784	39411836.
			Minimum	1041	12708.01



**Beban 9.000 N**

Output Vectors		Type	ID	Value	
Deformation					
1..Total Translation	▼	Node	Maximum	777	0.00679395
			Minimum	612	0.
Contour					
7033..Plate Top VonMises Stress	▼	Element	Maximum	784	44338316.
			Minimum	1041	14297.41



Beban 10.000 N

Output Vectors		Type	ID	Value	
Deformation					
1..Total Translation	▼	Node	Maximum Minimum	777 612	0.00754884 0.
Contour					
7033..Plate Top VonMises Stress	▼	Element	Maximum Minimum	784 1041	49264796. 15886.03

Beban 12.000 N

Output Vectors		Type	ID	Value	
Deformation					
1..Total Translation	▼	Node	Maximum	777	0.0030586
			Minimum	612	0.
Contour					
7033..Plate Top VonMises Stress	▼	Element	Maximum	784	59117748.
			Minimum	1041	19063.14

Beban 14.000 N

Output Vectors		Type	ID	Value	
Deformation					
1..Total Translation		Node	Maximum	777	0.0105684
			Minimum	612	0.
Contour					
7033..Plate Top VonMises Stress		Element	Maximum	784	68970704.
			Minimum	1041	22240.37

Beban 16.000 N

Output Vectors		Type	ID	Value
Deformation				
1..Total Translation	▼	Node	Maximum : 777 Minimum 612	0.0120781 0.
Contour				
7033..Plate Top VonMises Stress	▼	Element	Maximum 784 Minimum 1041	78823672. 25417.62

**Beban 18.000 N**

Output Vectors		Type	ID	Value
Deformation				
1..Total Translation	▼	Node	Maximum 777 Minimum 612	0.0135879 0.
Contour				
7033..Plate Top VonMises Stress	▼	Element	Maximum 784 Minimum 1041	88676632. 28594.82

Beban 20.000 N

Output Vectors		Type	ID	Value
Deformation				
1..Total Translation	▼	Node	Maximum 777 Minimum 612	0.0150977 0.
Contour				
7033..Plate Top VonMises Stress	▼	Element	Maximum 784 Minimum 1041	98529592. 31772.06

Hasil Running MSC NASTRAN Untuk Kayu Kayu Laminasi Dua Layer**Beban 1.000 N**

Output Vectors		Type	ID	Value
Deformation				
1..Total Translation	▼	Node	Maximum 1163 Minimum 1320	6.48546E-4 0.
Contour				
7033..Plate Top VonMises Stress	▼	Element	Maximum 1000 Minimum 899	4771230. 3250.203

Beban 2.000 N

Output Vectors		Type	ID	Value
Deformation				
1..Total Translation	▼	Node	Maximum 1163 Minimum 1320	0.00129709 0.
Contour				
7033..Plate Top VonMises Stress	▼	Element	Maximum 1000 Minimum 899	9542460. 6500.406

Beban 3.000 N

Output Vectors		Type	ID	Value
Deformation				
1..Total Translation	▼	Node	Maximum 1163 Minimum 1320	0.00194564 0.
Contour				
7033..Plate Top VonMises Stress	▼	Element	Maximum 1000 Minimum 899	14313690. 9750.601

**Beban 4.000 N**

Output Vectors				
Deformation	Type	ID	Value	
1..Total Translation	Node	Maximum	1163	0.00259419
		Minimum	1320	0.
Contour	Element	Maximum	1000	19084920.
		Minimum	899	13000.73

Beban 5.000 N

Output Vectors				
Deformation	Type	ID	Value	
1..Total Translation	Node	Maximum	1163	0.00324273
		Minimum	1320	0.
Contour	Element	Maximum	1000	23856150.
		Minimum	899	16250.99

Beban 6.000 N

Output Vectors				
Deformation	Type	ID	Value	
1..Total Translation	Node	Maximum	1163	0.00389128
		Minimum	1320	0.
Contour	Element	Maximum	1000	28627380.
		Minimum	899	19501.2

Beban 7.000 N

Output Vectors				
Deformation	Type	ID	Value	
1..Total Translation	Node	Maximum	1163	0.00453982
		Minimum	1320	0.
Contour	Element	Maximum	1000	33398610.
		Minimum	899	22751.48

Beban 8.000 N

Output Vectors				
Deformation	Type	ID	Value	
1..Total Translation	Node	Maximum	1163	0.00518837
		Minimum	1320	0.
Contour	Element	Maximum	1000	38169840.
		Minimum	899	26001.63

**Beban 9.000 N**

Output Vectors		Type	ID	Value
Deformation				
1..Total Translation	▼	Node	Maximum 1163 Minimum 1320	0.00583692 0.
Contour				
7033..Plate Top VonMises Stress	▼	Element	Maximum 1000 Minimum 899	42941068. 29251.91

Beban 10.000 N

Output Vectors		Type	ID	Value
Deformation				
1..Total Translation	▼	Node	Maximum 1163 Minimum 1320	0.00648546 0.
Contour				
7033..Plate Top VonMises Stress	▼	Element	Maximum 1000 Minimum 899	47712300. 32501.97

Beban 12.000 N

Output Vectors		Type	ID	Value
Deformation				
1..Total Translation	▼	Node	Maximum 1163 Minimum 1320	0.00778256 0.
Contour				
7033..Plate Top VonMises Stress	▼	Element	Maximum 1000 Minimum 899	57254760. 39002.4

Beban 14.000 N

Output Vectors		Type	ID	Value
Deformation				
1..Total Translation	▼	Node	Maximum 1163 Minimum 1320	0.00907965 0.
Contour				
7033..Plate Top VonMises Stress	▼	Element	Maximum 1000 Minimum 899	66797216. 45502.55

Hasil Running MSC NASTRAN Untuk Kayu Laminasi Tiga Layer**Beban 1.000 N**

Output Vectors		Type	ID	Value
Deformation				
1..Total Translation	▼	Node	Maximum 3114 Minimum 3661	0.00082148 0.
Contour				
7033..Plate Top VonMises Stress	▼	Element	Maximum 2500 Minimum 1903	6214108. 1711.078

**Beban 2.000 N**

Output Vectors		Type	ID	Value
Deformation				
1..Total Translation	▼	Node	Maximum 3114 Minimum 3661	0.00164296 0.
Contour				
7033..Plate Top VonMises Stress	▼	Element	Maximum 2500 Minimum 1903	12428215. 3422.156

Beban 3.000 N

Output Vectors		Type	ID	Value
Deformation				
1..Total Translation	▼	Node	Maximum 3114 Minimum 3661	0.00246444 0.
Contour				
7033..Plate Top VonMises Stress	▼	Element	Maximum 2500 Minimum 1903	18642324. 5133.325

Beban 4.000 N

Output Vectors		Type	ID	Value
Deformation				
1..Total Translation	▼	Node	Maximum 3114 Minimum 3661	0.00328592 0.
Contour				
7033..Plate Top VonMises Stress	▼	Element	Maximum 2500 Minimum 1903	24856430. 6844.312

Beban 5.000 N

Output Vectors		Type	ID	Value
Deformation				
1..Total Translation	▼	Node	Maximum 3114 Minimum 3661	0.0041074 0.
Contour				
7033..Plate Top VonMises Stress	▼	Element	Maximum 2500 Minimum 1903	31070540. 8555.52

Beban 6.000 N

Output Vectors		Type	ID	Value
Deformation				
1..Total Translation	▼	Node	Maximum 3114 Minimum 3661	0.00492888 0.
Contour				
7033..Plate Top VonMises Stress	▼	Element	Maximum 2500 Minimum 1903	37284648. 10266.65



**Beban 7.000 N**

Output Vectors				
		Type	ID	Value
Deformation				
1..Total Translation	▼	Node	Maximum	3114 0.00575036
			Minimum	3661 0.
Contour				
7033..Plate Top VonMises Stress	▼	Element	Maximum	2500 43498752.
			Minimum	1903 , 11977.7

Beban 8.000 N

Output Vectors		Type	ID	Value
Deformation				
1..Total Translation	▼	Node	Maximum	3114 0.00657184
			Minimum	3661 0.
Contour				
7033..Plate Top VonMises Stress	▼	Element	Maximum	2500 49712860.
			Minimum	1903 13688.62

Beban 9.000 N

Output Vectors				ID	Value
Deformation		Type			
1..Total Translation		Node	Maximum	3114	0.00739332
			Minimum	3661	0.
Contour					
7033..Plate Top VonMises Stress		Element	Maximum	2500	55926972.
			Minimum	1903	15399.91

Beban 10.000 N

Output Vectors				
		Type	ID	Value
Deformation				
1..Total Translation	▼	Node	Maximum	3114 0.0082148
			Minimum	3661 0.
Contour				
7033..Plate Top VonMises Stress	▼	Element	Maximum	2500 62141080.
			Minimum	1903 17111.04



Hasil Output Query Element Secara Melintang pada Kayu Tunggal Biasa
Pada Beban 10.000 N

Element 778

Output Set 4 - MSC/NASTRAN Case 1

Output Vector 6043	- Plate Top Fiber	= 0.1
Output Vector 6044	- Plate Bottom Fiber	= -0.1
Output Vector 7020	- Plate Top X Normal Stress	= -6914988.
Output Vector 7021	- Plate Top Y Normal Stress	= -30917580.
Output Vector 7023	- Plate Top XY Shear Stress	= 2498754.
Output Vector 7026	- Plate Top MajorPrn Stress	= -6657619.
Output Vector 7027	- Plate Top MinorPrn Stress	= -31174950.
Output Vector 7029	- Plate Top PrnStress Angle	= 5.88068
Output Vector 7030	- Plate Top Mean Stress	= -18916284.
Output Vector 7031	- Plate Top MaxShear Stress	= 12258666.
Output Vector 7033	- Plate Top VonMises Stress	= 28436780.
Output Vector 7420	- Plate Bot X Normal Stress	= -6914988.
Output Vector 7421	- Plate Bot Y Normal Stress	= -30917580.
Output Vector 7423	- Plate Bot XY Shear Stress	= 2498754.
Output Vector 7426	- Plate Bot MajorPrn Stress	= -6657619.
Output Vector 7427	- Plate Bot MinorPrn Stress	= -31174950.
Output Vector 7429	- Plate Bot PrnStress Angle	= 5.88068
Output Vector 7430	- Plate Bot Mean Stress	= -18916284.
Output Vector 7431	- Plate Bot MaxShear Stress	= 12258666.
Output Vector 7433	- Plate Bot VonMises Stress	= 28436780.

Element 781

Output Set 4 - MSC/NASTRAN Case 1

Output Vector 6043	- Plate Top Fiber	= 0.1
Output Vector 6044	- Plate Bottom Fiber	= -0.1
Output Vector 7020	- Plate Top X Normal Stress	= -4861772.
Output Vector 7021	- Plate Top Y Normal Stress	= -17200480.
Output Vector 7023	- Plate Top XY Shear Stress	= -77930.9
Output Vector 7026	- Plate Top MajorPrn Stress	= -4861280.
Output Vector 7027	- Plate Top MinorPrn Stress	= -17200972.
Output Vector 7029	- Plate Top PrnStress Angle	= -0.36186
Output Vector 7030	- Plate Top Mean Stress	= -11031126.
Output Vector 7031	- Plate Top MaxShear Stress	= 6169846.
Output Vector 7033	- Plate Top VonMises Stress	= 15358605.
Output Vector 7420	- Plate Bot X Normal Stress	= -4861772.
Output Vector 7421	- Plate Bot Y Normal Stress	= -17200480.
Output Vector 7423	- Plate Bot XY Shear Stress	= -77930.9
Output Vector 7426	- Plate Bot MajorPrn Stress	= -4861280.
Output Vector 7427	- Plate Bot MinorPrn Stress	= -17200972.
Output Vector 7429	- Plate Bot PrnStress Angle	= -0.36186
Output Vector 7430	- Plate Bot Mean Stress	= -11031126.
Output Vector 7431	- Plate Bot MaxShear Stress	= 6169846.
Output Vector 7433	- Plate Bot VonMises Stress	= 15358605.

Element 782

Output Set 4 - MSC/NASTRAN Case 1

Output Vector 6043	- Plate Top Fiber	= 0.1
Output Vector 6044	- Plate Bottom Fiber	= -0.1
Output Vector 7020	- Plate Top X Normal Stress	= -3288540.
Output Vector 7021	- Plate Top Y Normal Stress	= -4982525.
Output Vector 7023	- Plate Top XY Shear Stress	= 585558.



Output Vector 7026	- Plate Top MajorPrn Stress = -3105836.
Output Vector 7027	- Plate Top MinorPrn Stress = -5165228.
Output Vector 7029	- Plate Top PrnStress Angle = 17.3288
Output Vector 7030	- Plate Top Mean Stress = -4135532.
Output Vector 7031	- Plate Top MaxShear Stress = 1029696.
Output Vector 7033	- Plate Top VonMises Stress = 4503715.
Output Vector 7420	- Plate Bot X Normal Stress = -3288540.
Output Vector 7421	- Plate Bot Y Normal Stress = -4982525.
Output Vector 7423	- Plate Bot XY Shear Stress = 585558.
Output Vector 7426	- Plate Bot MajorPrn Stress = -3105836.
Output Vector 7427	- Plate Bot MinorPrn Stress = -5165228.
Output Vector 7429	- Plate Bot PrnStress Angle = 17.3288
Output Vector 7430	- Plate Bot Mean Stress = -4135532.
Output Vector 7431	- Plate Bot MaxShear Stress = 1029696.
Output Vector 7433	- Plate Bot VonMises Stress = 4503715.

Element 783

Output Set 4 - MSC/NASTRAN Case 1

Output Vector 6043	- Plate Top Fiber	= 0.1
Output Vector 6044	- Plate Bottom Fiber	= -0.1
Output Vector 7020	- Plate Top X Normal Stress	= -1743337.
Output Vector 7021	- Plate Top Y Normal Stress	= 3905086.
Output Vector 7023	- Plate Top XY Shear Stress	= 1165424.
Output Vector 7026	- Plate Top MajorPrn Stress	= 4136097.
Output Vector 7027	- Plate Top MinorPrn Stress	= -1974348.
Output Vector 7029	- Plate Top PrnStress Angle	= 78.7881
Output Vector 7030	- Plate Top Mean Stress	= 1080875.
Output Vector 7031	- Plate Top MaxShear Stress	= 3055222.
Output Vector 7033	- Plate Top VonMises Stress	= 5401059.
Output Vector 7420	- Plate Bot X Normal Stress	= -1743337.
Output Vector 7421	- Plate Bot Y Normal Stress	= 3905086.
Output Vector 7423	- Plate Bot XY Shear Stress	= 1165424.
Output Vector 7426	- Plate Bot MajorPrn Stress	= 4136097.
Output Vector 7427	- Plate Bot MinorPrn Stress	= -1974348.
Output Vector 7429	- Plate Bot PrnStress Angle	= 78.7881
Output Vector 7430	- Plate Bot Mean Stress	= 1080875.
Output Vector 7431	- Plate Bot MaxShear Stress	= 3055222.
Output Vector 7433	- Plate Bot VonMises Stress	= 5401059.

Element 784

Output Set 4 - MSC/NASTRAN Case 1

Output Vector 6043	- Plate Top Fiber	= 0.1
Output Vector 6044	- Plate Bottom Fiber	= -0.1
Output Vector 7020	- Plate Top X Normal Stress	= 49195496.
Output Vector 7021	- Plate Top Y Normal Stress	= -138296.
Output Vector 7023	- Plate Top XY Shear Stress	= 5343.54
Output Vector 7026	- Plate Top MajorPrn Stress	= 49195500.
Output Vector 7027	- Plate Top MinorPrn Stress	= -138297.
Output Vector 7029	- Plate Top PrnStress Angle	= 0.0062059
Output Vector 7030	- Plate Top Mean Stress	= 24528602.
Output Vector 7031	- Plate Top MaxShear Stress	= 24666898.
Output Vector 7033	- Plate Top VonMises Stress	= 49264796.
Output Vector 7420	- Plate Bot X Normal Stress	= 49195496.
Output Vector 7421	- Plate Bot Y Normal Stress	= -138296.
Output Vector 7423	- Plate Bot XY Shear Stress	= 5343.54
Output Vector 7426	- Plate Bot MajorPrn Stress	= 49195500.



Output Vector 7427	- Plate Bot MinorPrn Stress = -138297.
Output Vector 7429	- Plate Bot PrnStress Angle = 0.0062059
Output Vector 7430	- Plate Bot Mean Stress = 24528602.
Output Vector 7431	- Plate Bot MaxShear Stress = 24666898.
Output Vector 7433	- Plate Bot VonMises Stress = 49264796.

**Hasil Output Query Element Secara Melintang pada Kayu Tunggal Biasa
Pada Beban 10.000 N**

Element 799

Output Set 4 - MSC/NASTRAN Case 1

Output Vector 6043	- Plate Top Fiber	= 0.1
Output Vector 6044	- Plate Bottom Fiber	= -0.1
Output Vector 7020	- Plate Top X Normal Stress	= -4918517.
Output Vector 7021	- Plate Top Y Normal Stress	= -17266576.
Output Vector 7023	- Plate Top XY Shear Stress	= -2807633.
Output Vector 7026	- Plate Top MajorPrn Stress	= -4310110.
Output Vector 7027	- Plate Top MinorPrn Stress	= -17874982.
Output Vector 7029	- Plate Top PrnStress Angle	= -12.2268
Output Vector 7030	- Plate Top Mean Stress	= -11092546.
Output Vector 7031	- Plate Top MaxShear Stress	= 6782436.
Output Vector 7033	- Plate Top VonMises Stress	= 16157007.
Output Vector 7420	- Plate Bot X Normal Stress	= -4918517.
Output Vector 7421	- Plate Bot Y Normal Stress	= -17266576.
Output Vector 7423	- Plate Bot XY Shear Stress	= -2807633.
Output Vector 7426	- Plate Bot MajorPrn Stress	= -4310110.
Output Vector 7427	- Plate Bot MinorPrn Stress	= -17874982.
Output Vector 7429	- Plate Bot PrnStress Angle	= -12.2268
Output Vector 7430	- Plate Bot Mean Stress	= -11092546.
Output Vector 7431	- Plate Bot MaxShear Stress	= 6782436.
Output Vector 7433	- Plate Bot VonMises Stress	= 16157007.

Element 800

Output Set 4 - MSC/NASTRAN Case 1

Output Vector 6043	- Plate Top Fiber	= 0.1
Output Vector 6044	- Plate Bottom Fiber	= -0.1
Output Vector 7020	- Plate Top X Normal Stress	= -32143296.
Output Vector 7021	- Plate Top Y Normal Stress	= -3541571.
Output Vector 7023	- Plate Top XY Shear Stress	= 1543903.
Output Vector 7026	- Plate Top MajorPrn Stress	= -3458473.
Output Vector 7027	- Plate Top MinorPrn Stress	= -32226394.
Output Vector 7029	- Plate Top PrnStress Angle	= 86.9191
Output Vector 7030	- Plate Top Mean Stress	= -17842434.
Output Vector 7031	- Plate Top MaxShear Stress	= 14383960.
Output Vector 7033	- Plate Top VonMises Stress	= 30643880.
Output Vector 7420	- Plate Bot X Normal Stress	= -32143296.
Output Vector 7421	- Plate Bot Y Normal Stress	= -3541571.
Output Vector 7423	- Plate Bot XY Shear Stress	= 1543903.
Output Vector 7426	- Plate Bot MajorPrn Stress	= -3458473.
Output Vector 7427	- Plate Bot MinorPrn Stress	= -32226394.
Output Vector 7429	- Plate Bot PrnStress Angle	= 86.9191
Output Vector 7430	- Plate Bot Mean Stress	= -17842434.
Output Vector 7431	- Plate Bot MaxShear Stress	= 14383960.
Output Vector 7433	- Plate Bot VonMises Stress	= 30643880.



Element 1199

Output Set 4 - MSC/NASTRAN Case 1

Output Vector 6043	- Plate Top Fiber	= 0.1
Output Vector 6044	- Plate Bottom Fiber	= -0.1
Output Vector 7020	- Plate Top X Normal Stress	= -2845342.
Output Vector 7021	- Plate Top Y Normal Stress	= -2020584.
Output Vector 7023	- Plate Top XY Shear Stress	= -27275.9
Output Vector 7026	- Plate Top MajorPrn Stress	= -2019683.
Output Vector 7027	- Plate Top MinorPrn Stress	= -2846243.
Output Vector 7029	- Plate Top PrnStress Angle	= -88.1079
Output Vector 7030	- Plate Top Mean Stress	= -2432963.
Output Vector 7031	- Plate Top MaxShear Stress	= 413280.
Output Vector 7033	- Plate Top VonMises Stress	= 2536082.
Output Vector 7420	- Plate Bot X Normal Stress	= -2845342.
Output Vector 7421	- Plate Bot Y Normal Stress	= -2020584.
Output Vector 7423	- Plate Bot XY Shear Stress	= -27275.9
Output Vector 7426	- Plate Bot MajorPrn Stress	= -2019683.
Output Vector 7427	- Plate Bot MinorPrn Stress	= -2846243.
Output Vector 7429	- Plate Bot PrnStress Angle	= -88.1079
Output Vector 7430	- Plate Bot Mean Stress	= -2432963.
Output Vector 7431	- Plate Bot MaxShear Stress	= 413280.
Output Vector 7433	- Plate Bot VonMises Stress	= 2536082.

Element 1200

Output Set 4 - MSC/NASTRAN Case 1

Output Vector 6043	- Plate Top Fiber	= 0.1
Output Vector 6044	- Plate Bottom Fiber	= -0.1
Output Vector 7020	- Plate Top X Normal Stress	= -1837067.
Output Vector 7021	- Plate Top Y Normal Stress	= -2718217.
Output Vector 7023	- Plate Top XY Shear Stress	= -23985.3
Output Vector 7026	- Plate Top MajorPrn Stress	= -1836414.
Output Vector 7027	- Plate Top MinorPrn Stress	= -2718869.
Output Vector 7029	- Plate Top PrnStress Angle	= -1.55808
Output Vector 7030	- Plate Top Mean Stress	= -2277642.
Output Vector 7031	- Plate Top MaxShear Stress	= 441227.
Output Vector 7033	- Plate Top VonMises Stress	= 2402436.
Output Vector 7420	- Plate Bot X Normal Stress	= -1837067.
Output Vector 7421	- Plate Bot Y Normal Stress	= -2718217.
Output Vector 7423	- Plate Bot XY Shear Stress	= -23985.3
Output Vector 7426	- Plate Bot MajorPrn Stress	= -1836414.
Output Vector 7427	- Plate Bot MinorPrn Stress	= -2718869.
Output Vector 7429	- Plate Bot PrnStress Angle	= -1.55808
Output Vector 7430	- Plate Bot Mean Stress	= -2277642.
Output Vector 7431	- Plate Bot MaxShear Stress	= 441227.
Output Vector 7433	- Plate Bot VonMises Stress	= 2402436.

Element 999

Output Set 4 - MSC/NASTRAN Case 1

Output Vector 6043	- Plate Top Fiber	= 0.1
Output Vector 6044	- Plate Bottom Fiber	= -0.1
Output Vector 7020	- Plate Top X Normal Stress	= -1947671.
Output Vector 7021	- Plate Top Y Normal Stress	= 2317434.
Output Vector 7023	- Plate Top XY Shear Stress	= 320770.
Output Vector 7026	- Plate Top MajorPrn Stress	= 2341423.
Output Vector 7027	- Plate Top MinorPrn Stress	= -1971660.
Output Vector 7029	- Plate Top PrnStress Angle	= 85.723



Output Vector 7030	- Plate Top Mean Stress	= 184882.
Output Vector 7031	- Plate Top MaxShear Stress	= 2156542.
Output Vector 7033	- Plate Top VonMises Stress	= 3739813.
Output Vector 7420	- Plate Bot X Normal Stress	= -1947671.
Output Vector 7421	- Plate Bot Y Normal Stress	= 2317434.
Output Vector 7423	- Plate Bot XY Shear Stress	= 320770.
Output Vector 7426	- Plate Bot MajorPrn Stress	= 2341423.
Output Vector 7427	- Plate Bot MinorPrn Stress	= -1971660.
Output Vector 7429	- Plate Bot PrnStress Angle	= 85.723
Output Vector 7430	- Plate Bot Mean Stress	= 184882.
Output Vector 7431	- Plate Bot MaxShear Stress	= 2156542.
Output Vector 7433	- Plate Bot VonMises Stress	= 3739813.

Element 1000

Output Set 4 - MSC/NASTRAN Case 1

Output Vector 6043	- Plate Top Fiber	= 0.1
Output Vector 6044	- Plate Bottom Fiber	= -0.1
Output Vector 7020	- Plate Top X Normal Stress	= 47358484.
Output Vector 7021	- Plate Top Y Normal Stress	= -679014.
Output Vector 7023	- Plate Top XY Shear Stress	= -582958.
Output Vector 7026	- Plate Top MajorPrn Stress	= 47365556.
Output Vector 7027	- Plate Top MinorPrn Stress	= -686087.
Output Vector 7029	- Plate Top PrnStress Angle	= -0.69517
Output Vector 7030	- Plate Top Mean Stress	= 23339734.
Output Vector 7031	- Plate Top MaxShear Stress	= 24025822.
Output Vector 7033	- Plate Top VonMises Stress	= 47712300.
Output Vector 7420	- Plate Bot X Normal Stress	= 47358484.
Output Vector 7421	- Plate Bot Y Normal Stress	= -679014.
Output Vector 7423	- Plate Bot XY Shear Stress	= -582958.
Output Vector 7426	- Plate Bot MajorPrn Stress	= 47365556.
Output Vector 7427	- Plate Bot MinorPrn Stress	= -686087.
Output Vector 7429	- Plate Bot PrnStress Angle	= -0.69517
Output Vector 7430	- Plate Bot Mean Stress	= 23339734.
Output Vector 7431	- Plate Bot MaxShear Stress	= 24025822.
Output Vector 7433	- Plate Bot VonMises Stress	= 47712300.

Hasil Output Query Element Secara Melintang pada Kayu Tunggal Biasa Pada Beban 10.000 N

Element 2019

Output Set 4 - MSC/NASTRAN Case 1

Output Vector 6043	- Plate Top Fiber	= 0.1
Output Vector 6044	- Plate Bottom Fiber	= -0.1
Output Vector 7020	- Plate Top X Normal Stress	= -6003840.
Output Vector 7021	- Plate Top Y Normal Stress	= -10463018.
Output Vector 7023	- Plate Top XY Shear Stress	= -3099037.
Output Vector 7026	- Plate Top MajorPrn Stress	= -4415695.
Output Vector 7027	- Plate Top MinorPrn Stress	= -12051164.
Output Vector 7029	- Plate Top PrnStress Angle	= -27.1335
Output Vector 7030	- Plate Top Mean Stress	= -8233429.
Output Vector 7031	- Plate Top MaxShear Stress	= 3817735.
Output Vector 7033	- Plate Top VonMises Stress	= 10560050.
Output Vector 7420	- Plate Bot X Normal Stress	= -6003840.
Output Vector 7421	- Plate Bot Y Normal Stress	= -10463018.
Output Vector 7423	- Plate Bot XY Shear Stress	= -3099037.
Output Vector 7426	- Plate Bot MajorPrn Stress	= -4415695.



Output Vector 7427 - Plate Bot MinorPrn Stress = -12051164.
Output Vector 7429 - Plate Bot PrnStress Angle = -27.1335
Output Vector 7430 - Plate Bot Mean Stress = -8233429.
Output Vector 7431 - Plate Bot MaxShear Stress = 3817735.
Output Vector 7433 - Plate Bot VonMises Stress = 10560050.

Element 2020

Output Set 4 - MSC/NASTRAN Case 1

Output Vector 6043 - Plate Top Fiber = 0.1
Output Vector 6044 - Plate Bottom Fiber = -0.1
Output Vector 7020 - Plate Top X Normal Stress = -56796112.
Output Vector 7021 - Plate Top Y Normal Stress = -4078368.
Output Vector 7023 - Plate Top XY Shear Stress = 2415463.
Output Vector 7026 - Plate Top MajorPrn Stress = -3967926.
Output Vector 7027 - Plate Top MinorPrn Stress = -56906556.
Output Vector 7029 - Plate Top PrnStress Angle = 87.3821
Output Vector 7030 - Plate Top Mean Stress = -30437240.
Output Vector 7031 - Plate Top MaxShear Stress = 26469316.
Output Vector 7033 - Plate Top VonMises Stress = 55029988.
Output Vector 7420 - Plate Bot X Normal Stress = -56796112.
Output Vector 7421 - Plate Bot Y Normal Stress = -4078368.
Output Vector 7423 - Plate Bot XY Shear Stress = 2415463.
Output Vector 7426 - Plate Bot MajorPrn Stress = -3967926.
Output Vector 7427 - Plate Bot MinorPrn Stress = -56906556.
Output Vector 7429 - Plate Bot PrnStress Angle = 87.3821
Output Vector 7430 - Plate Bot Mean Stress = -30437240.
Output Vector 7431 - Plate Bot MaxShear Stress = 26469316.
Output Vector 7433 - Plate Bot VonMises Stress = 55029988.

Element 2680

Output Set 4 - MSC/NASTRAN Case 1

Output Vector 6043 - Plate Top Fiber = 0.1
Output Vector 6044 - Plate Bottom Fiber = -0.1
Output Vector 7020 - Plate Top X Normal Stress = -5126071.
Output Vector 7021 - Plate Top Y Normal Stress = -2580064.
Output Vector 7023 - Plate Top XY Shear Stress = 516646.
Output Vector 7026 - Plate Top MajorPrn Stress = -2479218.
Output Vector 7027 - Plate Top MinorPrn Stress = -5226916.
Output Vector 7029 - Plate Top PrnStress Angle = 78.9552
Output Vector 7030 - Plate Top Mean Stress = -3853067.
Output Vector 7031 - Plate Top MaxShear Stress = 1373849.
Output Vector 7033 - Plate Top VonMises Stress = 4528632.
Output Vector 7420 - Plate Bot X Normal Stress = -5126071.
Output Vector 7421 - Plate Bot Y Normal Stress = -2580064.
Output Vector 7423 - Plate Bot XY Shear Stress = 516646.
Output Vector 7426 - Plate Bot MajorPrn Stress = -2479218.
Output Vector 7427 - Plate Bot MinorPrn Stress = -5226916.
Output Vector 7429 - Plate Bot PrnStress Angle = 78.9552
Output Vector 7430 - Plate Bot Mean Stress = -3853067.
Output Vector 7431 - Plate Bot MaxShear Stress = 1373849.
Output Vector 7433 - Plate Bot VonMises Stress = 4528632.

Element 2259

Output Set 4 - MSC/NASTRAN Case 1

Output Vector 6043 - Plate Top Fiber = 0.1
Output Vector 6044 - Plate Bottom Fiber = -0.1



Output Vector 7020	- Plate Top X Normal Stress = -1747254.
Output Vector 7021	- Plate Top Y Normal Stress = -1990614.
Output Vector 7023	- Plate Top XY Shear Stress = 87394.1
Output Vector 7026	- Plate Top MajorPrn Stress = -1719122.
Output Vector 7027	- Plate Top MinorPrn Stress = -2018746.
Output Vector 7029	- Plate Top PrnStress Angle = 17.8435
Output Vector 7030	- Plate Top Mean Stress = -1868934.
Output Vector 7031	- Plate Top MaxShear Stress = 149812.
Output Vector 7033	- Plate Top VonMises Stress = 1886861.
Output Vector 7420	- Plate Bot X Normal Stress = -1747254.
Output Vector 7421	- Plate Bot Y Normal Stress = -1990614.
Output Vector 7423	- Plate Bot XY Shear Stress = 87394.1
Output Vector 7426	- Plate Bot MajorPrn Stress = -1719122.
Output Vector 7427	- Plate Bot MinorPrn Stress = -2018746.
Output Vector 7429	- Plate Bot PrnStress Angle = 17.8435
Output Vector 7430	- Plate Bot Mean Stress = -1868934.
Output Vector 7431	- Plate Bot MaxShear Stress = 149812.
Output Vector 7433	- Plate Bot VonMises Stress = 1886861.

Element 2260

Output Set 4 - MSC/NASTRAN Case 1

Output Vector 6043	- Plate Top Fiber	= 0.1
Output Vector 6044	- Plate Bottom Fiber	= -0.1
Output Vector 7020	- Plate Top X Normal Stress	= 4495108.
Output Vector 7021	- Plate Top Y Normal Stress	= -1201844.
Output Vector 7023	- Plate Top XY Shear Stress	= 529983.
Output Vector 7026	- Plate Top MajorPrn Stress	= 4543992.
Output Vector 7027	- Plate Top MinorPrn Stress	= -1250728.
Output Vector 7029	- Plate Top PrnStress Angle	= 5.26992
Output Vector 7030	- Plate Top Mean Stress	= 1646632.
Output Vector 7031	- Plate Top MaxShear Stress	= 2897360.
Output Vector 7033	- Plate Top VonMises Stress	= 5281618.
Output Vector 7420	- Plate Bot X Normal Stress	= 4495108.
Output Vector 7421	- Plate Bot Y Normal Stress	= -1201844.
Output Vector 7423	- Plate Bot XY Shear Stress	= 529983.
Output Vector 7426	- Plate Bot MajorPrn Stress	= 4543992.
Output Vector 7427	- Plate Bot MinorPrn Stress	= -1250728.
Output Vector 7429	- Plate Bot PrnStress Angle	= 5.26992
Output Vector 7430	- Plate Bot Mean Stress	= 1646632.
Output Vector 7431	- Plate Bot MaxShear Stress	= 2897360.
Output Vector 7433	- Plate Bot VonMises Stress	= 5281618.

Element 2801

Output Set 4 - MSC/NASTRAN Case 1

Output Vector 6043	- Plate Top Fiber	= 0.1
Output Vector 6044	- Plate Bottom Fiber	= -0.1
Output Vector 7020	- Plate Top X Normal Stress	= 2073069.
Output Vector 7021	- Plate Top Y Normal Stress	= -1309154.
Output Vector 7023	- Plate Top XY Shear Stress	= -50342.8
Output Vector 7026	- Plate Top MajorPrn Stress	= 2073818.
Output Vector 7027	- Plate Top MinorPrn Stress	= -1309903.
Output Vector 7029	- Plate Top PrnStress Angle	= -0.85257
Output Vector 7030	- Plate Top Mean Stress	= 381958.
Output Vector 7031	- Plate Top MaxShear Stress	= 1691860.
Output Vector 7033	- Plate Top VonMises Stress	= 2955176.
Output Vector 7420	- Plate Bot X Normal Stress	= 2073069.



Output Vector 7421	- Plate Bot Y Normal Stress = -1309154.
Output Vector 7423	- Plate Bot XY Shear Stress = -50342.8
Output Vector 7426	- Plate Bot MajorPrn Stress = 2073818.
Output Vector 7427	- Plate Bot MinorPrn Stress = -1309903.
Output Vector 7429	- Plate Bot PrnStress Angle = -0.85257
Output Vector 7430	- Plate Bot Mean Stress = 381958.
Output Vector 7431	- Plate Bot MaxShear Stress = 1691860.
Output Vector 7433	- Plate Bot VonMises Stress = 2955176.

Element 2499

Output Set 4 - MSC/NASTRAN Case 1

Output Vector 6043	- Plate Top Fiber	= 0.1
Output Vector 6044	- Plate Bottom Fiber	= -0.1
Output Vector 7020	- Plate Top X Normal Stress	= -1067885.
Output Vector 7021	- Plate Top Y Normal Stress	= 3463925.
Output Vector 7023	- Plate Top XY Shear Stress	= -69689.9
Output Vector 7026	- Plate Top MajorPrn Stress	= 3464996.
Output Vector 7027	- Plate Top MinorPrn Stress	= -1068956.
Output Vector 7029	- Plate Top PrnStress Angle	= -89.1192
Output Vector 7030	- Plate Top Mean Stress	= 1198020.
Output Vector 7031	- Plate Top MaxShear Stress	= 2266976.
Output Vector 7033	- Plate Top VonMises Stress	= 4105216.
Output Vector 7420	- Plate Bot X Normal Stress	= -1067885.
Output Vector 7421	- Plate Bot Y Normal Stress	= 3463925.
Output Vector 7423	- Plate Bot XY Shear Stress	= -69689.9
Output Vector 7426	- Plate Bot MajorPrn Stress	= 3464996.
Output Vector 7427	- Plate Bot MinorPrn Stress	= -1068956.
Output Vector 7429	- Plate Bot PrnStress Angle	= -89.1192
Output Vector 7430	- Plate Bot Mean Stress	= 1198020.
Output Vector 7431	- Plate Bot MaxShear Stress	= 2266976.
Output Vector 7433	- Plate Bot VonMises Stress	= 4105216.

Element 2500

Output Set 4 - MSC/NASTRAN Case 1

Output Vector 6043	- Plate Top Fiber	= 0.1
Output Vector 6044	- Plate Bottom Fiber	= -0.1
Output Vector 7020	- Plate Top X Normal Stress	= 61920332.
Output Vector 7021	- Plate Top Y Normal Stress	= -411865.
Output Vector 7023	- Plate Top XY Shear Stress	= -755918.
Output Vector 7026	- Plate Top MajorPrn Stress	= 61929496.
Output Vector 7027	- Plate Top MinorPrn Stress	= -421031.
Output Vector 7029	- Plate Top PrnStress Angle	= -0.6947
Output Vector 7030	- Plate Top Mean Stress	= 30754232.
Output Vector 7031	- Plate Top MaxShear Stress	= 31175264.
Output Vector 7033	- Plate Top VonMises Stress	= 62141080.
Output Vector 7420	- Plate Bot X Normal Stress	= 61920332.
Output Vector 7421	- Plate Bot Y Normal Stress	= -411865.
Output Vector 7423	- Plate Bot XY Shear Stress	= -755918.
Output Vector 7426	- Plate Bot MajorPrn Stress	= 61929496.
Output Vector 7427	- Plate Bot MinorPrn Stress	= -421031.
Output Vector 7429	- Plate Bot PrnStress Angle	= -0.6947
Output Vector 7430	- Plate Bot Mean Stress	= 30754232.
Output Vector 7431	- Plate Bot MaxShear Stress	= 31175264.
Output Vector 7433	- Plate Bot VonMises Stress	= 62141080.